



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO E DETERMINAÇÃO
DE ÍNDICES DE CONFORTO ACÚSTICO EM ENGENHARIA
AUTOMOBILÍSTICA**

CARLA JÚLIO DA SILVEIRA BRIZON

Belo Horizonte, 28 de março de 2012.

Carla Júlio da Silveira Brizon

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO E DETERMINAÇÃO
DE ÍNDICES DE CONFORTO ACÚSTICO EM ENGENHARIA
AUTOMOBILÍSTICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Calor e Fluídos

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Bauzer Medeiros

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

*Dedico este trabalho àqueles que são
bênçãos maiores de Deus em minha vida;
meu querido esposo Wellington e nossos
amados filhos Fernando e Isabela.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, por permitir que chegasse até aqui. A ELE devo tudo, inclusive essa conquista.

Ao professor Bauzer pela confiança de sempre. Pelos ensinamentos e orientações e principalmente pelo seu valioso e imprescindível apoio para realização deste trabalho.

A FIAT Automóveis S.A. por acreditar e viabilizar o desenvolvimento desse trabalho através de algumas pessoas especiais: Gilmar Laignier, Robson Cotta, Silvio Piancastelli, Marcelo Starling, Flávio Vidal, José Guilherme.

Aos colegas da FIAT (NVH) que direto ou indiretamente contribuíram para esse trabalho, em especial à Camila com a sua dedicação ímpar, ao Felipe, Anderson, Fred, Rogério, Wagner Moura e Edgar.

A FAPEMIG pelo suporte recebido no desenvolvimento deste projeto.

Aos queridos amigos sempre presentes em minha vida: Cris Saleme, Cris Perry, Paoli, Diana, Alex, Wally e Gabi.

A minha mãe Iracy e minhas irmãs Adriana e Silvana.

Especialmente ao meu esposo Wellington, por seu imensurável companheirismo, não me deixando desistir nunca e suportando toda a ausência e falhas nesse período.

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE GRÁFICOS	11
LISTA DE QUADROS E TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
NOMENCLATURA	17
RESUMO.....	19
ABSTRACT	20
1. INTRODUÇÃO	21
1.1 Visão geral.....	21
1.2 Síntese do problema	22
1.3 Motivação e justificativa da proposta.....	25
1.4 Objetivos.....	26
1.5 Contribuições e inovações pretendidas.....	26
1.6 Escopo do trabalho	26
2. RUIDO VEICULAR.....	27
2.1 Principais fontes	27
2.1.1 Propulsão:	28
2.1.2 Suspensão:	28
2.1.3 Aerodinâmica:	29
2.1.4 Acessórios:	30
2.1.5 Técnicas para caracterização de fonte de ruído	30
2.2 Trajetórias de transferência	31
2.2.1 Análise por Trajetórias de Transferência (Transfer Path Analysis)	32
2.3 Percepção e conforto	34
2.3.1 Conforto acústico.....	37
2.3.2 Conforto vibracional.....	40
3. QUALIDADE SONORA	47
3.1 Visão geral.....	47
3.2 Avaliação da qualidade sonora	50
3.3 Mecanismos de audição.....	53

3.3.1 O sistema auditivo	53
3.3.2 Fisiologia da audição	56
3.3.2.1 Audição Via Aérea	56
3.3.2.2 Audição Via Óssea	57
3.3.3 Sensação subjetiva.....	58
3.3.3.1 Banda crítica	60
3.3.3.2 Sensação subjetiva de intensidade dos sons (“loudness”).....	61
3.3.3.3 Sensação subjetiva de frequência dos sons	64
3.3.3.4 Alguns fenômenos que interferem na sensação subjetiva dos sons	65
3.4 Métricas de psicoacústica	68
3.4.1 “Loudness” (N).....	69
3.4.2 “Sharpness” (S)	71
3.4.3 “Fluctuation Strength” (F) e “Roughness” (R).....	73
3.5 Outros parâmetros	74
3.5.1 Índice de articulação (I.A)	74
3.5.2 Curtose (K)	77
4. APLICAÇÃO À INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	79
4.1 Principais trabalhos	79
4.3 Principais contribuições.....	101
5. MATERIAIS E MÉTODOS	102
5.1 Dispositivo Experimental	102
5.1.1 Instrumentação.....	103
5.1.1.1 Medição de ruído	103
5.1.1.2 Medição de vibração.....	104
5.1.1.3 Medição de velocidade	105
5.1.1.4 Medição de rotação.....	105
5.1.1.5 Gravação de imagens.....	106
5.1.2 Sistema de Aquisição de Dados.....	107
5.1.2.1 Aquisição de ruído.....	107
5.1.2.2 Aquisição de vibração	107
5.1.3 Câmara Acústica.....	108
5.2 Procedimento experimental	108
5.2.1 Coleta de dados.....	108
5.2.1.1 Dados objetivos	109

5.2.1.2 Dados subjetivos.....	112
5.2.2 Condições de ensaio	113
5.2.2.1 Avaliação no circuito.....	114
5.2.2.2 Avaliação em pistas padronizadas	116
5.3.2.3 Avaliação em câmara acústica.....	117
5.3 - Metodologia de avaliação	118
5.3.1 – Dados objetivos	118
5.3.1.1 – Análise acústica	118
5.3.1.2 – Análise vibracional	121
5.3.2 – Dados subjetivos.....	123
5.3.3 – Determinação de índices de conforto	125
5.3.3.1 – Normalização dos coeficientes das equações	135
6. ANÁLISE DE RESULTADOS	136
6.1 – Análises descritivas	136
6.1.1 – Perfil dos avaliadores	136
6.1.2 – Avaliação dos veículos – Conforto acústico.....	142
6.2 – Índices de conforto acústico	151
6.3 – Análises complementares	166
6.3.1 – Avaliação dos veículos – Conforto vibracional.....	166
6.3.2 – Índices de conforto vibracional	172
6.3.2.1 Descrição por dados vibracionais	172
6.3.2.2 Descrição por dados acústicos.....	178
6.3.3 – Índice de conforto acústico em condições de testes padronizados.....	183
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES	187
7.1 – Conclusões finais.....	187
7.2 – Recomendações para trabalhos futuros	193
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195
APÊNDICE	205

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Fontes de ruído em veículo.....	27
FIGURA 2.2 – Fonte de ruído propulsão (a), (b) câmbio	28
FIGURA 2.3 – Fontes de ruído de rodagem (pneus).....	29
FIGURA 2.4 – Fontes de ruído aerodinâmica	29
FIGURA 2.5 – Fontes de ruído de sistemas acessórios (a) Alternador, (b) Eletro-ventilador, (c) Grupo de alimentação combustível.....	30
FIGURA 2.6 – Modelo do processo percepção ambiental.....	34
FIGURA 2.7 – Correlação entre ruído, vibração e percepção humana.....	40
FIGURA 2.8 – Variáveis que influenciam na percepção de vibração no corpo humano.....	42
FIGURA 2.9 – Fatores que afetam na percepção de vibração do volante.....	45
FIGURA 3.1 – Sistema auditivo humano.....	53
FIGURA 3.2 – Ouvido médio	53
FIGURA 3.3 – Ouvido médio	54
FIGURA 3.4 – Ouvido interno	54
FIGURA 3.5 – Membrana basilar	55
FIGURA 3.6 – Órgão de corti	55
FIGURA 3.7 – Processamento do som nos seres humanos.....	56
FIGURA 3.8 – Largura de banda crítica x sensação de dissonância e consonância	67
FIGURA 3.9 – Comparação dos métodos de cálculo para sharpness	73
FIGURA 4.1 – Rede neural artificial de múltiplos caminhos	95
FIGURA 5.1– Sistema de medição acústica (HMS – III)	104
FIGURA 5.2 – Acelerômetro triaxial isotron® Endevco.....	105
FIGURA 5.3 – Rodafônica.....	105
FIGURA 5.4 – Tacômetro digital.....	106
FIGURA 5.5 – Câmara fotográfica e filmadora	106
FIGURA 5.6 – Sistema de aquisição e gravação de ruído	107
FIGURA 5.7 – Sistema de aquisição e gravação de vibração	108
FIGURA 5.8 – Posição do sistema de medição acústica.....	109
FIGURA 5.9 – Posição do sensor de vibração no pavimento (ponto 3)	110
FIGURA 5.10 – Posição do sensor de vibração no volante (ponto 4).....	110

FIGURA 5.11 – Posição do sensor de vibração na alavanca de câmbio (ponto 5)	110
FIGURA 5.12 – Posição da rodafônica (leitura de velocidade)	111
FIGURA 5.13 – Posição do tacômetro (leitura de rotação)	111
FIGURA 5.14 – Trajeto do circuito – Calçamento	114
FIGURA 5.15 – Foto do circuito – Calçamento.....	115
FIGURA 5.16 – Trajeto e foto do circuito – Estrada	115
FIGURA 5.17 – Trajeto e foto do circuito – Urbano	116
FIGURA 5.18 – Software de análise e cálculo de parâmetros acústicos	119
FIGURA 5.19 – Software de análise e cálculo de parâmetros vibracionais.....	121
FIGURA 5.20 – Cálculo dos valores de RMS.....	121

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1 – Preferência à estímulos sonoros reduzidos x nível de vibração (%).....	46
GRÁFICO 3.1 – Limiar diferencial do NPS x tons puros.....	59
GRÁFICO 3.2 – Limiar diferencial da frequência para tons puros.....	59
GRÁFICO 3.3 – Área de audição dos seres humanos.....	60
GRÁFICO 3.4 – Largura da banda crítica em função da frequência central	61
GRÁFICO 3.5 – Curvas de mesmo nível de audibilidade para tons puros	62
GRÁFICO 3.6 – Relação entre frequência (Hz) e tonalidade (bark e mel).....	64
GRÁFICO 3.7 – Deslocamento do limiar da audibilidade por tom puro.....	66
GRÁFICO 3.8 – Deslocamento do limiar de audibilidade por tom puro.....	66
GRÁFICO 3.9 – Limites da região da fala	75
GRÁFICO 3.10 – Índice de articulação x inteligibilidade	77
GRÁFICO 4.1 – Resultados dos diferentes métodos em laboratório.....	81
GRÁFICO 4.2 – Resultados em laboratório x campo de teste.....	82
GRÁFICO 4.3 – Predição do conforto / “loudness” x parâmetros subjetivos e métricas psicoacústica.....	97
GRÁFICO 4.4 – Coeficientes R^2 de parâmetros psicoacústicos x tipo de pavimento	100
GRÁFICO 5.1 – Modelos de regressão para o parâmetro “roughness” x nota	128
GRÁFICO 6.1 – Características descritivas dos avaliadores	136
GRÁFICO 6.2– Atributos mais importantes para aquisição de um veículo	141
GRÁFICO 6.3 – Grau de importância do conforto acústico e vibracional	142
GRÁFICO 6.4 – Notas para conforto acústico.....	143
GRÁFICO 6.5 – Classificação final dos veículos para conforto acústico	143
GRÁFICO 6.6 – Notas para conforto acústico por trecho avaliado.....	144
GRÁFICO 6.7 – Ruídos incômodos em trecho de CALÇAMENTO	145
GRÁFICO 6.8 – Ruídos tipo “grilos” por veículo - CALÇAMENTO	145
GRÁFICO 6.9 – Ruídos de “rotolamento” ou de suspensão - CALÇAMENTO.....	146
GRÁFICO 6.10 – Ruídos incômodos em trecho de ESTRADA.....	146
GRÁFICO 6.11 – Ruídos aerodinâmicos ou “fruscio” - ESTRADA.....	147
GRÁFICO 6.12 – Ruídos tipo “grilos” - ESTRADA.....	147
GRÁFICO 6.13 – Ruídos de motor e acessórios - ESTRADA.....	148

GRÁFICO 6.14 – Ruídos de “rotolamento” ou de suspensão - ESTRADA.....	148
GRÁFICO 6.15 – Ruídos incômodos em trecho URBANO	149
GRÁFICO 6.16 – Ruídos de motor e acessórios - URBANO.....	149
GRÁFICO 6.17 – Ruídos tipo “grilos” - URBANO	150
GRÁFICO 6.18 – Preferência de compra de veículos (mesmas condições e preços).....	150
GRÁFICO 6.19 – Veículo que NÃO seria comprado (mesmas condições e preços)	151
GRÁFICO 6.20 – Parâmetros objetivos x condição de teste	152
GRÁFICO 6.21 – Notas para conforto vibracional.....	166
GRÁFICO 6.22 – Classificação final dos veículos para conforto vibracional.....	167
GRÁFICO 6.23 – Notas para conforto vibracional por trecho avaliado	167
GRÁFICO 6.24 – Vibrações incômodas em trecho de CALÇAMENTO.....	168
GRÁFICO 6.25 – Vibrações no volante percebida por veículo - CALÇAMENTO.....	168
GRÁFICO 6.26 – Vibrações nos retrovisores percebida por veículo - CALÇAMENTO	169
GRÁFICO 6.27 – Vibrações incômodas em trecho de ESTRADA	169
GRÁFICO 6.28 – Vibrações no volante percebida por veículo - ESTRADA	170
GRÁFICO 6.29 – Trepidações percebidas por veículo - ESTRADA	170
GRÁFICO 6.30 – Vibrações incômodas verificadas em trecho URBANO.....	171
GRÁFICO 6.31 – Trepidações percebidas por veículo - URBANO.....	171
GRÁFICO 6.32 – Vibrações no volante percebida por veículo - URBANO.....	172

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadros

QUADRO 2.1 – Sensibilidade dos sistemas humanos à vibração	42
QUADRO 3.1 – Escala SAE	52
QUADRO 3.2 – Transformação do som em sensações psíquicas pelo sistema auditivo.....	58
QUADRO 5.1 – Variáveis do modelo de regressão múltipla para conforto acústico	129
QUADRO 5.2 – Variáveis do modelo de regressão para conforto vibracional x vibração de diversos pontos	134
QUADRO 5.3 – Variáveis do modelo de regressão para conforto vibracional x influência do ruído.....	134

Tabelas

TABELA 3.1 – Valores de $N_s(f)$ e $P(f)$ usados no cálculo do IA	76
TABELA 5.1 – Características básicas dos veículos testados.....	103
TABELA 5.2 – Parâmetros acústicos medidos e calculados - calçamento	120
TABELA 5.3 – Parâmetros acústicos medidos e calculados - estrada.....	120
TABELA 5.4 – Parâmetros acústicos medidos e calculados - urbano	120
TABELA 5.5 – Parâmetros acústicos medidos e calculados - circuito global (média).....	120
TABELA 5.6 – Parâmetros vibracionais calculados - calçamento	122
TABELA 5.7 – Parâmetros vibracionais calculados - estrada	122
TABELA 5.8 – Parâmetros vibracionais calculados - urbano.....	122
TABELA 5.9 – Parâmetros vibracionais calculados – circuito global (médias).....	123
TABELA 5.10 – Média aritmética calculada para as notas atribuídas pelos 33 avaliadores .	125
TABELA 5.11 – Teste de aderência a curva normal de Kolmogorov-Smirnov	126
TABELA 5.12 – Cálculo dos índices de assimetria e curtose - aderência à DN.....	127
TABELA 5.13 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk	127
TABELA 5.14 – Regressões obtidas para as variáveis “roughness” x nota.....	128
TABELA 6.3 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Calçamento	155
TABELA 6.4 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de calçamento – Variáveis X4X6X7	157

TABELA 6.5 – Modelo 02 de regressão linear múltipla para o trecho de calçamento – Variáveis X2X4X7	158
TABELA 6.6 – Modelo 03 de regressão linear múltipla para o trecho de calçamento – Variáveis X3X5	159
TABELA 6.7 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Estrada	160
TABELA 6.8 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de estrada – Variáveis X2X3X7	160
TABELA 6.9 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Urbano	161
TABELA 6.10 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho urbano – Variáveis X2X4X7	162
TABELA 6.11 – Modelo 02 de regressão linear múltipla para o trecho urbano – Variáveis X4X5X6	163
TABELA 6.12 – Modelo 03 de regressão linear múltipla para o trecho urbano – Variáveis X5X6	164
TABELA 6.13 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Circuito global	165
TABELA 6.14 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o circuito global – Variáveis X5X6X7	165
TABELA 6.15 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Calçamento	173
TABELA 6.16 – Modelo 01 de regressão linear simples para o trecho de calçamento – Variável X1.....	173
TABELA 6.17 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Estrada	174
TABELA 6.18 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de estrada – Variáveis X1X3	175
TABELA 6.19 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Urbano	176
TABELA 6.20 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de urbano – Variáveis X1X2	176
TABELA 6.21 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Circuito Global	177

TABELA 6.22 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o circuito global – Variáveis X1X3	177
TABELA 6.23 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Calçamento	179
TABELA 6.24 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de calçamento – Variáveis X1X2	179
TABELA 6.25 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Estrada	180
TABELA 6.26 – Modelo 01 de regressão linear simples para o trecho de estrada – Variável X2	180
TABELA 6.27 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Urbano	181
TABELA 6.28 – Modelo 01 de regressão linear simples para o trecho urbano – Variável X2	181
TABELA 6.29 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Circuito Global	182
TABELA 6.30 – Modelo 01 de regressão linear simples para o circuito global – Variáveis X2	182
TABELA 6.31 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado de aceleração lenta em 5ª marcha.....	184
TABELA 6.32 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado de aceleração veloz em 2ª marcha	184
TABELA 6.33 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado em velocidade constante a 70km/h.....	185
TABELA 6.34 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado em velocidade constante a 90km/h.....	185
TABELA 6.35 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado em marcha lenta com o motor a quente.....	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANN	artificial neural networks
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
EAV	exposure action value
ELV	exposure limit value
ICA	índice de conforto acústico
ICV	índice de conforto vibracional
IQA	índice de qualidade acústica
IRI	international roughness index
ISO	International Organization for Standardization
NAH	nearfield acoustical holography
NPS	nível de pressão sonora
NVH	noise vibration and harshness
SAE	Society of Automotive Engineers
TPA	transfer path analyses
VACI	vehicular acoustical comfort index
VCI	vibração de corpo inteiro
VMB	vibração de mãos e braços

NOMENCLATURA

Letras Latinas

b_0, b_1, b_2	coeficientes de regressão
c, cte	constante
e	vetor de resíduos
E	excitação sonora em uma banda crítica
E_0	excitação correspondente a intensidade sonora de referência
E_{TQ}	excitação acústica no limiar do silêncio
f	frequência (Hz)
f_{mod}	frequência de modulação (Hz)
f_{nm}	frequência combinada (Hz)
FS	fluctuation strength (vacil)
$g'(z)$	função de ponderação
$H_{ij}(f)$	FRF entre o ponto i e a entrada da trajetória de transferência j
I_0	intensidade acústica de referência (W/m ²)
IA	índice de articulação (%)
k	número de variáveis independentes de um modelo de regressão
K	kurtosi
$L(f)$	pressão sonora do ruído interno do veículo em 1/3 oitava (dB)
M	mel (Hz)
M_r	momento de ordem r da média
N	loudness (sones)
N'	loudness específico (sones)
N_L	nível de loudness (fones)
$N_s(f)$	pressão sonora correspondente a cada 1/3 de oitava (dB)
$P(f)$	peso da máxima contribuição do índice de articulação em 1/3 de oitava
$P_{i,j}$	probabilidade de i em relação a j
R	roughness (asper)
R^2	coeficiente de determinação
R_{aj}^2	coeficiente de determinação ajustado

$R_i(f)$	espectro da resposta no receptor i (vibração ou pressão sonora)
R_j^2	coeficiente de determinação múltipla
S	sharpness (acum)
s	desvio padrão amostral
$S_j(f)$	espectro da força ou velocidade de volume operacional estimada na trajetória j
s_p^2	variância agrupada
SQ	soma dos quadrados
SQ_{reg}	soma dos quadrados devido a regressão
STQ	soma total dos quadrados
t	estatística de teste
$\overline{x_n}$	média extraída da amostra de uma população
$w_{i,j}$	pesos ou valores ótimos
z	razão de banda crítica (bark)

Letras Gregas

$\Delta L(z)$	profundidade de mascaramento
ε_i	erro aleatório
μ_n	média extraída de uma população
σ	desvio padrão

RESUMO

Um método que conduz à avaliação do conforto vibroacústico em automóveis é discutido. Esta área tem sido uma questão crucial para a indústria automotiva, como um fator chave em um mercado que se tornou cada vez mais exigente nos últimos anos. Mesmo que tenha havido um relativo desenvolvimento dedicado a esta questão, há ainda uma lacuna entre a determinação dos parâmetros vibroacústicos e os parâmetros de qualidade de conforto para veículos automotivos. O presente trabalho tem como principal objetivo uma contribuição para a correspondência entre parametrização veicular e conforto automotivo. Cinco automóveis do mesmo segmento automotivo, mas de diferentes marcas e modelos, foi a amostra escolhida para fornecer os dados necessários para análise do método proposto. Estes veículos foram testados em uma variedade de estradas e condições operacionais nas quais os parâmetros vibroacústicos “convencionais” medidos foram associados à opinião subjetiva dos avaliadores. Os dados resultantes foram organizados utilizando considerações de psicoacústica e o desenvolvimento de um método estatístico proposto. Como resultado, uma série de índices de conforto acústico e vibracional (ICA e ICV) foi obtida. Estes descritores foram correlacionados com as condições da estrada para o veículo em teste e suas condições operacionais correspondentes. Os dados obtidos foram organizados de forma a fornecer uma referência para o desenvolvimento de automóveis e análise do conforto veicular. Estes dados também foram comparados com a metodologia padrão atualmente em uso na indústria automobilística.

Ainda que o método proposto tenha origem na prática mencionada, o uso dos parâmetros, e particularmente a maneira pela qual eles estão associados fornece uma nova visão para essa área. Parâmetros raramente ou nunca utilizados nesta área, tais como curtose e o efeito combinado de parâmetros de vibração (sensação de corpo) e acústico (audição) foram associados indicando uma forte necessidade de modificação no procedimento padrão existente para a obtenção de parâmetros de projeto mais adequados.

Palavras chaves: “NVH”, psicoacústica, parametrização do conforto veicular, qualidade sonora.

ABSTRACT

A method leading to the evaluation of vibroacoustic comfort in motor cars is discussed. This area has been a crucial issue for the automotive industry, as a key factor in a market which has become increasingly demanding during the last years. Even though there has been a corresponding development dedicated to this issue there still a gap between vibroacoustic parameter determination and Comfort Quality parameters for motor cars. The present work represents a contribution where a correspondence between car parametrization and automotive comfort is the main objective.

Five motor cars, part of the same automotive consumer class but different in make and model have been the chosen sample to provide the necessary data to analyse the proposed method. These vehicles have been tested in a variety of road and operational conditions where the measured “conventional” vibroacoustic parameters have been associated with the subjective opinion of the testers. The resulting data have been organised using psychoacoustics considerations and a purpose developed statistical method. As a result, a range of acoustic and vibration comfort indicators (ACI and VCI) has been obtained. These descriptors have been correlated to the road conditions, to the vehicle under test and its corresponding operational condition. The obtained figures have been organised in order to provide a reference for car designers and car comfort analysis. These data have also been compared with the standard practice currently in use in the car industry.

Even though the proposed method has originated from the mentioned practice the use of the parameters, and particularly the way in which they are associated provides a new insight into this area. Parameters seldom if ever used in this area such as “Kurtosis” and the combined effect o vibration (body feel) and acoustic (hearing) parameters have been associated in a way that strongly indicates the need for modification in the standard procedures if proper design parameters are to be obtained.

Key words: NVH, psychoacoustics, car comfort parametrization, sound quality.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Visão geral

Nas sociedades industrializadas, em que o uso de carros de passeio tem prevalecido em relação às demais categorias, têm sido desenvolvidas diversas expectativas para o sentimento que um carro pode causar. Os ocupantes de veículos automotores formam um mercado cada vez mais exigente e os fabricantes de veículos têm colocado muitos esforços dentro de qualidades específicas dos seus produtos para melhor associá-lo a expectativa do consumidor. Essas expectativas estão muitas vezes relacionadas a outras características, como o custo e consumo de combustível, sendo levadas com o mesmo peso na hora da decisão de compra. Esses fatores (sentimento/aparência/custo/consumo de combustível) assumem vários valores diferentes dependendo da região geográfica e da cultura. Entretanto, em geral, a qualidade de um veículo tem sido fortemente melhorada em todos os aspectos, o que é considerado compatível com mundo atual.

Diante desse novo cenário, no qual estamos acostumados a esperar diferentes características para diferentes veículos, a valorização da qualidade sonora tem se tornado um gosto adquirido. Acredita-se que, nas sociedades na quais os automóveis tem sido o principal meio de transporte privado por décadas, motoristas e passageiros têm expectativas específicas para a qualidade sonora de um veículo (CERRATO, 2009).

Nesse contexto, as empresas automobilísticas têm se preocupado não só em reduzir o nível de ruído, mas também em desenvolver uma adequada qualidade sonora interior, a fim de se obter uma imagem mais atrativa da marca no mercado competitivo automobilístico. É ainda fundamental enfatizar-se que a análise acústica não pode ser realizada de forma eficiente se separada do problema de vibração mecânica, ainda que muitas vezes o usuário não tenha consciência deste fato. Na verdade, no caso automobilístico os dois fenômenos são interdependentes e acoplados. A sonoridade veicular e a qualidade vibracional são assuntos bem amplos, desde que nossa interação com o veículo é razoavelmente complexa. O áudio e respostas táteis estão associados ainda ao tipo de percurso ou sugestões visuais, que por sua vez estão em constantes mudanças em relação ao regime de condução do veículo.

Ruído e vibração representam um importante papel na harmonia geral de um veículo. O termo harmonia é usado para descrever a ligação entre forma e função e estabelecer um alvo de equilíbrio entre esses dois elementos para cada classe e tipo de veículo (CERRATO, 2009). Em outras palavras, os veículos de hoje têm que desempenhar todas as funções que os motoristas e passageiros esperam enquanto permanecem em contato com um ambiente confortável e agradável.

Na tratativa do comportamento vibroacústico dois aspectos devem ser considerados: a maneira como os estímulos são gerados e como o usuário percebe a resposta a estes estímulos, do ponto de vista de conforto e qualidade. O que se observa aqui é que os procedimentos de análise utilizados pelos fabricantes no Brasil ainda é incompleto. A correta avaliação destes aspectos se inicia pela determinação dos parâmetros influentes, seguida da determinação de procedimentos de análise.

Em contrapartida, tem-se ainda que a geração destes estímulos não é um fato isolado, estando ligada aos mais diversos sistemas e formas de operação do veículo. Isto significa em última análise que os estímulos estão ligados não simplesmente ao conceito de qualidade, mas que, sobretudo afetam toda a concepção de projeto, uma vez que até mesmo a estética externa pode alterar os percursos de transmissão vibroacústicos.

Para a correta análise e síntese do problema, é necessária uma avaliação completa, que requer consideração cuidadosa de um grande universo de parâmetros. A etapa inicial de um desenvolvimento desta natureza compreende uma avaliação crítica para se determinar o tipo de parâmetro a ser considerado, a forma de como analisá-lo e sua relevância para o objetivo de determinação da qualidade final. Isso, obviamente, representa novos desafios para a engenharia automotiva, bem como novas oportunidades para pensamentos inovadores.

1.2 Síntese do problema

Impressões auditivas que causam incômodos nos quais o som não é desejado são frequentemente referidas como ruído. Exemplos típicos são máquinas de corte, ruído aerodinâmico e de rodagem de veículos, máquinas ou ventiladores no ambiente de trabalho. Exemplos de ruídos veiculares, que embora incômodos não contribuam significativamente para o nível de pressão sonora, são dos limpadores de vidro, bomba de combustível,

alternadores, etc. Para expressar a qualidade ruim ou um incômodo, diversos conceitos qualitativos como os de rombo, assovio, chiado, batimento, aspereza, agudeza, rugosidade, interferência da fala são utilizados para caracterizar o som ou ruído.

Mas nem tudo que se ouve é ruim ou indesejável. O som pode ser um importante mensageiro da informação, na qual transmite uma sensação positiva. Exemplos disso é a solidez de um fechamento de porta, a sensação de esportividade do motor de um carro (ou escapamento) durante a aceleração, a suavidade do motor de uma limousine, o acoplamento de uma fechadura de porta, ou do sinto de segurança, etc. Em todos esses casos, o ruído não precisa ser removido, mas deve ser um som correto ou agradável.

Para se descrever o conforto acústico ou esta sensação de agradável é necessário que se fique claro que o nível de pressão sonora não é suficiente, ou mesmo adequado, para representar corretamente as efetivas sensações de audição. A qualidade sonora é determinada pela harmonia de diferentes componentes espectrais. Essa questão de harmonia não é capaz de ser compreendido por meio de técnicas convencionais de medição (GENUIT e GLERLICH, 1989). Trata-se de um processo muito complexo devido à natureza das impressões auditivas dos sinais acústicos (ou sons), levando ao uso de conceitos tais como o de qualidade do som.

Um dos fundamentais problemas com a qualidade sonora é que “o que se ouve não é necessariamente o que foi gerado”. Características físicas não lineares do ouvido humano fazem com que o som percebido não esteja diretamente relacionado ao nível sonoro inicialmente gerado (BISTAFÁ, 2006). Além disso, a apreciação ou não de um som depende em grande parte da situação ou atitude do receptor ou ouvinte. O conhecimento dos aspectos físicos e psicoacústicos da audição humana são essenciais para o entendimento da qualidade sonora e técnicas relacionadas para a sua avaliação.

Em outras palavras, o ruído não pode ser encarado somente de modo objetivo e quantificado apenas ou isoladamente pelo nível de pressão sonora e/ou com a frequência. Existem fatores subjetivos que influenciam a avaliação do ruído pelo indivíduo. O ser humano classifica a sensação de ruído por adjetivos pelos quais os aparelhos de medição de ruído não são capazes de detectar ou identificar.

É necessário considerar os limites auditivos, limiares de dor, percepção da intensidade e da frequência do som, mascaramento, e os efeitos da audição binaural (localização das fontes, efeito estéreo, surround, etc.)

A psicoacústica, através de suas métricas, tenta descrever a relação entre estímulos (o ruído) e a sensação auditiva (ZWICKER e FASTL, 1999). Nesse ponto vale ressaltar que a qualidade sonora propriamente dita, abrange um conceito mais amplo, demonstrando-se como a aptidão do som de um produto sob as qualidades desejadas do beneficiário (GERGES et. al, 2003).

Faz-se necessário esclarecer que não é possível medir qualidade sonora, e sim as propriedades físicas do som e das vibrações. Essas podem ser gravadas, analisadas e servirem de base para cálculo de parâmetros psicoacústicos. Subjetivamente, ainda é possível ouvir o som, sentir as vibrações e avaliá-los. A combinação dos dados objetivos (parâmetros e demais resultados de análise) e dos resultados das avaliações subjetivas é que podem ser entendidas como indicador de “Quality Sound”.

Por isso é necessária não apenas uma abordagem da correlação dos parâmetros físicos do som e seus estímulos, mas também o conhecimento de uma metodologia de avaliação subjetiva que reflita as condições de incômodo ou prazer dos usuários de veículos.

No que se refere à determinação e uso dos parâmetros psicoacústicos na indústria automotiva, verifica-se que esses parâmetros têm sido aplicados para (PINTO et al., 2001):

- Identificação das principais fontes de ruído,
- Estabelecimento de metas para emissão de ruído de componentes,
- Avaliação de alternativas durante o desenvolvimento de componentes,
- Determinação de sons mais agradáveis de acordo com a opinião do cliente,
- Avaliação de produtos da concorrência.

Mas para responder o que seria um ruído apropriado para um veículo, é necessário o desenvolvimento de uma metodologia ampla, que contemple uma avaliação quantitativa, a relação desta com os parâmetros e efeitos psicológicos inerentes a percepção do ruído, buscando diretrizes de projeto e desenvolvimento, bem como a criação de índices a partir de valores medidos.

A difusão do conhecimento sobre psicoacústica entre os engenheiros da indústria automotiva, bem como sua aplicabilidade com relação aos dados objetivos, subjetivos e metodologias de avaliação, irá contribuir para o desenvolvimento de novos modelos e irá, também, assegurar uma melhor qualidade sonora para os consumidores.

1.3 Motivação e justificativa da proposta

A relevância desta proposta está ligada principalmente a dois fatores, a saber:

- O segmento automotivo nacional tem se tornado cada vez mais competitivo, fazendo uso em larga escala de veículos internacionais tropicalizados, gerando necessidades crescentes de referências ou parâmetros de conforto vibroacústico para adequação à realidade nacional;
- Os parâmetros, procedimentos e métricas, em particular os de psicoacústica representam procedimentos ainda incipientes em nosso meio.

Quando os dois fatores anteriores são reunidos fica também caracterizada a questão da inovação tecnológica e científica desta proposta.

De forma geral, pode-se afirmar que a metodologia proposta fornece uma *nova visão* para a área automotiva, destacando-se principalmente como avanço na técnica de avaliação do conforto vibro-acústico através:

- Do uso de parâmetros (psicoacústicos e “convencionais”) e particularmente a maneira pela qual são associados;
- Da utilização de parâmetros raramente ou nunca utilizados, tais como a curtose
- Da análise do efeito combinado da vibração (sensação de corpo) e acústico (audição)
- Da tentativa de associar testes de rua a condições padronizadas.

1.4 Objetivos

Os objetivos principais do trabalho podem ser resumidos pelos seguintes itens:

- Realizar uma correlação entre a análise psicoacústica veicular, avaliação de desempenho vibroacústico e avaliação subjetiva.
- Uma nova proposta de avaliação veicular, em particular buscando a definição de uma melhor forma para se avaliar e escolher as métricas mais adequadas à definição da psicoacústica automobilística.
- Verificar a possibilidade de criação de índices de conforto vibroacústico que possam ser utilizados como parâmetros de avaliação veicular e também como metas para o desenvolvimento de novos projetos.

1.5 Contribuições e inovações pretendidas

Pretende-se a partir deste trabalho desenvolver uma metodologia de avaliação mais adequada para a definição de conforto vibroacústico automobilístico dentro do ambiente nacional. Esta primeira parte da proposta já apresenta certo grau de inovação dentro de nosso meio. Mas, além disto, pretende-se uma melhor definição das métricas da psicoacústica buscando-se uma definição mais racional no âmbito automobilístico.

1.6 Escopo do trabalho

O presente trabalho é estruturado em sete capítulos distintos incluindo a introdução acima apresentada.

No segundo e terceiro capítulo é abordada uma revisão bibliográfica sobre ruído veicular e qualidade sonora. No quarto capítulo é referenciado o “estado da arte” com as principais contribuições aplicadas à indústria automobilística. No quinto capítulo é descrito detalhadamente os dispositivos e procedimentos experimentais, bem como a metodologia de análise adotada. No sexto capítulo, resultados qualitativos e quantitativos são apresentados e discutidos. Por último, no sétimo capítulo, as conclusões são citadas seguidas das recomendações para trabalhos futuros.

2. RUÍDO VEICULAR

Uma revisão bibliográfica sobre o mecanismo de geração, transmissão e percepção do ruído veicular é abordada no presente capítulo. As principais fontes de ruído veicular são apresentadas e uma breve discussão sobre técnicas de identificação de fontes sonoras e análise de trajetórias de transferência é verificada. Conceitos sobre os mecanismos de recepção de estímulos e percepção do conforto são destacados fazendo-se uma correlação direta com as disciplinas de acústica e vibração.

2.1 Principais fontes

O conforto vibroacústico está diretamente relacionado à percepção do usuário ou receptor das fontes geradoras de ruído em um veículo. Elas podem ser separadas em conjuntos (adaptado de GIORJÃO et al., 2007), conforme sua origem (FIG. 2.1):

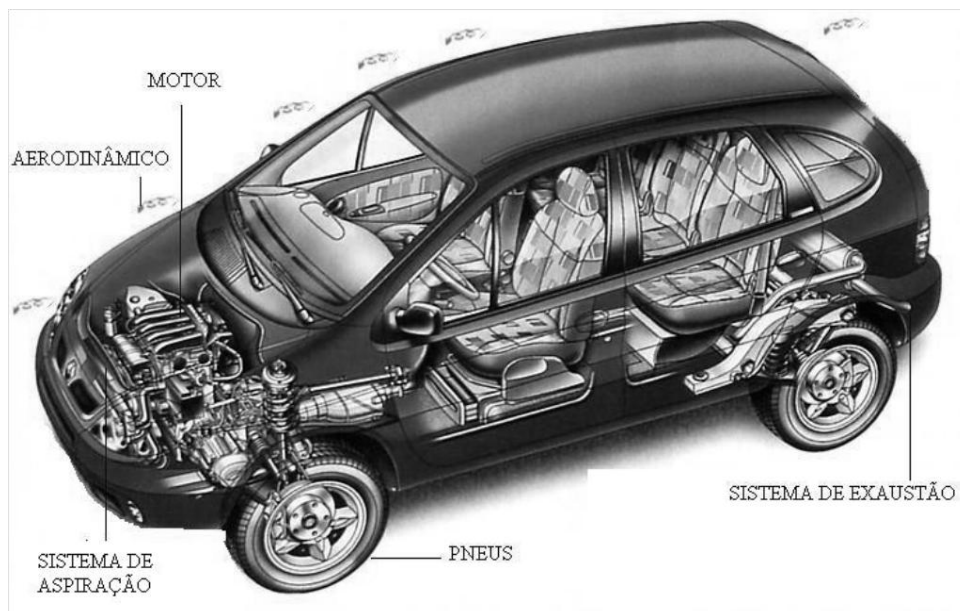


FIGURA 2.1 – Fontes de ruído em veículo

FONTE: NVH – Fiat Automóveis S.A

2.1.1 Propulsão:

Consideram-se incluídos nessa fonte o motor, câmbio, sistema de aspiração e descarga, presentes na condição dinâmica do veículo em aceleração, desaceleração, velocidade constante e marcha lenta (FIG. 2.2). Essa classe de fontes irradia ruído pelo ar através de suas superfícies e gera vibrações que são transmitidas pela estrutura. Parte dessa pode se comportar como elemento irradiante para o interior do veículo, que é o caso das chapas mais planas como painel corta-fogo, assoalho e teto.

As fontes de propulsão constituem as principais fontes de ruído interno, principalmente para baixas velocidades (GERGES, 2005).

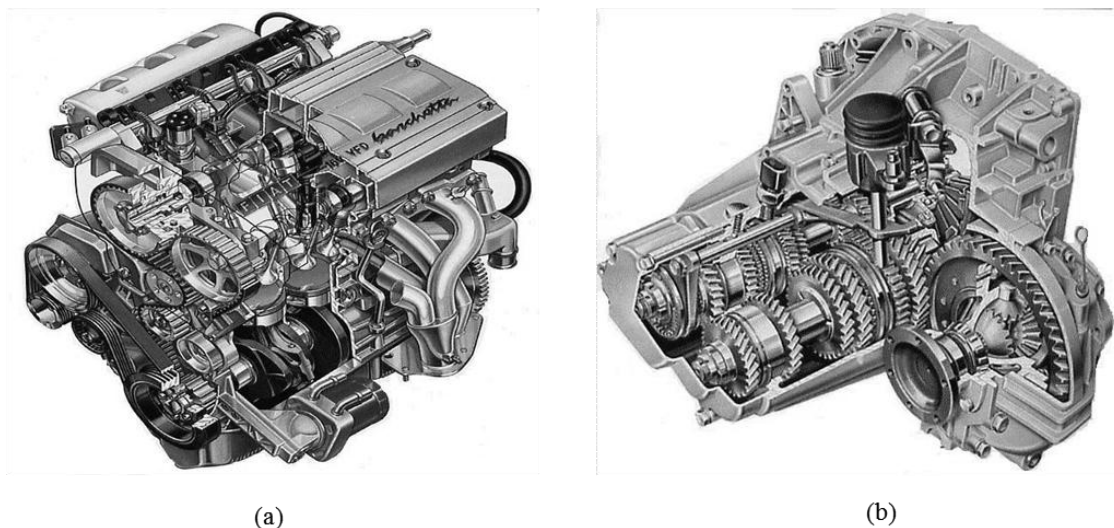


FIGURA 2.2 – Fonte de ruído propulsão (a), (b) câmbio

FONTE: GERGES, 2005.

2.1.2 Suspensão:

Estão incluídos os pneus, além de outros elementos como travessas, amortecedores e molas. A vibração proveniente dos diversos tipos de pavimentos é transmitida para o veículo podendo ser amplificada ou atenuada de acordo com as características dos elementos da suspensão.

Geralmente esse sistema se comporta como um filtro passa-baixa atenuando os níveis de vibração gerados pelo pavimento acima de 30 ou 40 Hz. O contato do pneu com o pavimento gera vibração que excita os modos da estrutura pneu/roda, assim como gera ruído que é percebido, tanto dentro, quanto fora do veículo (FIG.2.3).

Esse ruído, conhecido como de rodagem, é considerado o principal ruído externo ao veículo para velocidades acima de 60 km/h. E constitui também uma importante fonte de ruído para o interior do veículo (GERGES, 2005).

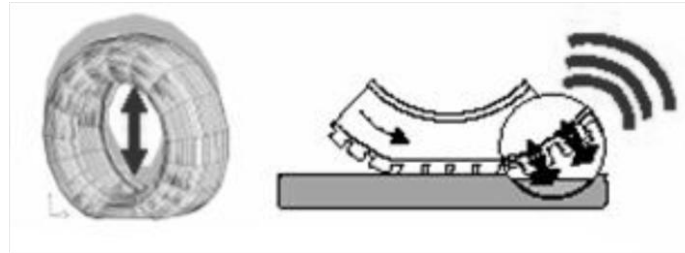


FIGURA 2.3 – Fontes de ruído de rodagem (pneus)

FONTE: NVH – Fiat Automóveis S.A

2.1.3 Aerodinâmica:

O ruído aerodinâmico é causado pelo movimento do ar em torno da estrutura externa do veículo. Na FIGURA 2.4 são enumerados de 1 a 20 alguns elementos típicos que contribuem para esse tipo de ruído como retrovisor externo, limpador de pára-brisa, barra de teto, acabamentos externos, frestas e cavidades (elementos críticos específicos da geometria do veículo apresentado são destacados através dos pontos 17, 13, 4, 5, etc.). O termo “fruscio” pode ser utilizado para expressar o ruído associado a descontinuidades no campo de escoamento de um veículo. É um ruído normalmente percebido acima de 100 km/h, uma vez que, em velocidades mais baixas, outras fontes são mais predominantes (CERRATO, 2009).

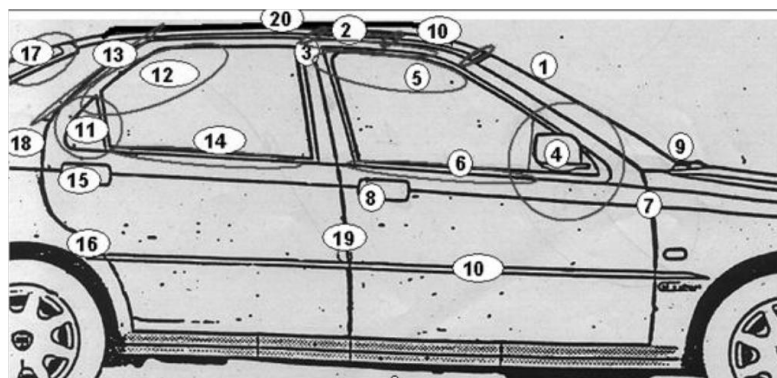


FIGURA 2.4 – Fontes de ruído aerodinâmica

FONTE: NVH – Fiat Automóveis S.A

2.1.4 Acessórios:

São geralmente pequenos motores elétricos que acionam elementos de apoio aos principais sistemas do veículo ou ao condutor. Alguns exemplos: mecanismo do vidro da porta, sistema de arrefecimento, alternador, limpador de para-brisa, bomba de partida a frio (FIG. 2.5). Esses elementos, além de irradiarem ruído, estão ligados à estrutura e constituem mais uma porta de entrada de vibração e, conseqüentemente, potencial fonte de ruído.

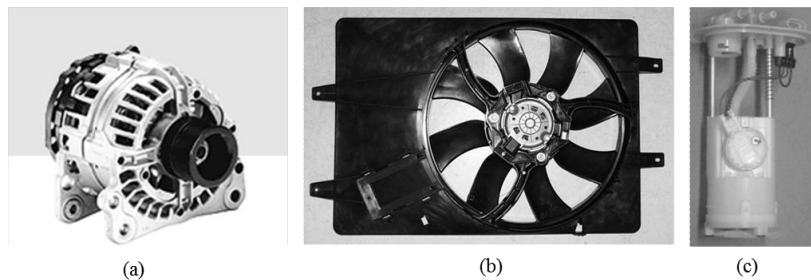


FIGURA 2.5 – Fontes de ruído de sistemas acessórios (a) Alternador, (b) Eletro-ventilador, (c) Grupo de alimentação combustível

FONTE: NVH – Fiat Automóveis S.A

2.1.5 Técnicas para caracterização de fonte de ruído

Historicamente, a caracterização das fontes de ruído se deu através da determinação da potência sonora utilizando métodos baseados na medição da pressão sonora (método de engenharia) ou intensidade sonora (método de laboratório). A técnica da intensidade sonora é utilizada na identificação do ruído emitido para o exterior do veículo, com o objetivo de caracterizar e quantificar a potência sonora das fontes e seu padrão de irradiação (MACHADO, 2003).

Como evolução a essa técnica, os métodos baseados em arranjos de microfones “microphone arrays” demonstraram grande potencial, inclusive para aplicações no interior do veículo. Duas técnicas se destacaram, sendo a primeira a holografia acústica em campo próximo “Nearfield Acoustical Holography” ou NAH. A NAH utiliza informações do campo próximo de fontes sonoras para identificar, através de “imagens acústicas”, pontos de maior e menor energia sonora. A técnica utiliza medições acústicas definidas em um plano paralelo à superfície da fonte, independente da sua geometria.

MAYNARD et al. (1985) apresentam o modelamento básico da técnica. Trabalhos mais recentes apresentam avanços consideráveis na automação da medição através de robôs instalados no interior do veículo (CROIX et al., 2007).

A segunda técnica baseada em arranjos planos de microfones é “beamforming”, que também caracteriza o campo sonoro através de imagens acústicas, identificando os pontos nos quais a região analisada apresenta maiores níveis. É capaz de mapear grandes fontes a longas distâncias, principalmente em altas frequências (GERGES et al., 2007). No setor automotivo existe a utilização de arranjos esféricos de microfones para avaliar a contribuição de painéis e regiões frágeis no estudo do ruído interno (MARROQUIN et al., 2007).

As técnicas descritas, quando aplicadas no interior do veículo, são eficientes para identificar as fontes de ruído percebidas pelo receptor. Pontos frágeis no isolamento do habitáculo, regiões ou painéis mais transparentes à passagem do ruído aéreo e painéis mais suscetíveis à irradiação são resultados importantes para o desenvolvimento de veículos, mas não são suficientes em todos os casos. O conhecimento da trajetória pela qual a energia vibroacústica percorre é fundamental para o entendimento completo do problema. Além disso, evidencia elementos que podem impedir a transferência de energia assim que ela for gerada pela fonte, ou antes, que atinja elementos menos robustos ou que possuam tratamentos mais caros.

2.2 Trajetórias de transferência

Entre a geração e a percepção do ruído encontra-se a transmissão de energia pela estrutura e pelo ar. As trajetórias de transferência de ruído e vibração representam os caminhos pelos quais a energia vibroacústica é transmitida desde as fontes geradoras até atingir o ocupante do veículo, seja pela percepção da vibração, através do tato (mãos e pés), seja pela percepção sonora, através dos ouvidos.

Segundo ONUSIC (2001), na década de 70, realizava-se a descoberta da transmissão via aérea e via estrutura (corpórea) pelo processo de desvinculamento. A análise subjetiva era extremamente forte. Os períodos para o desenvolvimento de veículos, entretanto, tornaram-se cada vez menores, assim os procedimentos experimentais necessitam ser conclusivos em curto prazo. O remanejamento constante de grandes fontes de ruído e vibração como o motor passa a ser limitante para o processo de desenvolvimento.

Por questões de consumo, os veículos estão cada vez mais leves, com isso os problemas relacionados à geração e transmissão de ruído e vibração tendem a aumentar, devido à redução de parâmetros como rigidez e massa. A maior flexibilidade das estruturas também torna as amplitudes de vibração maiores, demandando soluções acústicas mais refinadas (ONUSIC, 2001).

A evolução das pesquisas que têm objetivo de reduzir o ruído gerado pelas fontes principais tem sido um dos fatores determinantes para a diminuição, com o passar das décadas, dos níveis percebidos dentro do veículo. Torna-se cada vez mais difícil distinguir com clareza a origem do ruído, uma vez que este está superposto ao ruído proveniente de fontes secundárias.

Identificar as trajetórias pelas quais a energia vibroacústica é transmitida para o interior do veículo, bem como a separação das fontes, são tarefas complementares. Vários conceitos foram formulados em torno do receptor e das fontes de ruído e vibração. Entretanto, os aspectos envolvendo a tríade fonte-trajetória-receptor devem ser projetados em conjunto, pois o resultado para o conforto do usuário é o somatório da eficiência dessas questões.

Devido à complexidade das estruturas automotivas e à grande quantidade de fontes de ruído instaladas nas estruturas, as trajetórias vibroacústicas não são facilmente identificáveis. O grau de correlação entre as fontes (motor e sistema de descarga, por exemplo) dificulta a identificação das trajetórias, todos esses fatores são considerados na técnica de TPA.

2.2.1 Análise por Trajetórias de Transferência (Transfer Path Analysis)

A análise por trajetórias de transferência (TPA) é uma técnica utilizada para modelar os caminhos de transmissão da energia vibroacústicos por meio da estimação dos sinais que chegam até os receptores, o que comumente é representado pelos ocupantes do veículo. A utilização do conjunto de técnicas associadas a este procedimento permite, portanto, quantificar os sinais vibroacústicos que chegam até estes receptores fazendo uso dos parâmetros objetivos das ondas mecânicas que se propagam pelo ar ou pela estrutura do veículo (BAUZER e GUIMARÃES, 2008).

De particular interesse para o presente estudo está o fato em que a técnica permite que se avalie como um determinado estímulo objetivo foi modificado pelo seu percurso, e, portanto,

teve sua forma de excitação no receptor final alterada. Por exemplo, um determinado som originado dentro do compartimento do motor pode chegar de forma completamente diferente no receptor através da parede de corta-fogo, que comumente funciona como irradiador.

A técnica necessita basicamente de dois parâmetros: as FRFs (“frequency response functions”) entre o receptor e os pontos de entrada do sistema em estudo; e a estimação das forças que são aplicadas aos pontos de entrada durante condições normais de operação. Para processos de transferência puramente acústicos, a velocidade de volume da fonte é considerada como parâmetro de entrada. Para modelos nos quais existem caminhos estruturais são consideradas as forças aplicadas à estrutura (BAUZER e GUIMARÃES, 2008).

A resposta que chega ao ocupante do veículo, que pode ser vibração ou ruído, consiste na sobreposição da contribuição de cada trajetória de transmissão considerada pelo modelo apresentado na EQ.(2.1):

$$R_i(f) = \sum_{j=1}^n H_{ij}(f) \cdot S_j(f) \quad (2.1)$$

Na qual:

$R_i(f)$ = Espectro da resposta no receptor i (vibração ou pressão sonora)

$H_{ij}(f)$ = FRF entre o ponto i e a entrada da trajetória de transferência j

$S_j(f)$ = Espectro da força ou velocidade de volume operacional estimada na entrada da trajetória de transferência j

A estimativa destas forças operacionais é feita de forma indireta uma vez que a forma direta modifica os parâmetros estruturais ou aéreos e introduz restrições ao funcionamento normal do veículo (BAUZER e GUIMARÃES, 2008).

A caracterização das trajetórias através da técnica de TPA permitirá também ordená-las de forma a avaliar suas respectivas contribuições individuais. Os projetos poderão então, ser direcionados a atuar sobre as trajetórias mais críticas a fim de atingir mais rapidamente o nível de conforto acústico solicitado como objetivo do modelo “target”.

Nesse cenário, uma série de componentes pode ser projetada de forma mais eficiente do ponto de vista acústico:

- As estruturas poderão ser calculadas de forma a atender parâmetros mais específicos de transmissão de vibração.
- Parâmetros como rigidez dinâmica dos pontos de fixação à estrutura podem se tornar variáveis mais controladas em projeto.
- As características dinâmicas dos elementos isoladores podem ser inseridas num contexto mais completo.
- A definição dos pacotes acústicos ou “sound packages” poderá estar acompanhada de objetivos mais detalhados.
- Os fornecedores dos elementos isolantes (coxins e suspensão do motor, por exemplo) receberão informações mais detalhadas do comportamento dinâmico desejado.

2.3 Percepção e conforto

A reação no comportamento humano a uma sensação de conforto ou desconforto só é possível através da percepção à priori do ambiente. Segundo OKAMOTO apud RIBEIRO (2004), o comportamento é conduzido por uma resposta à percepção do ambiente através dos estímulos provocados pelo mesmo: *“Temos a sensação do ambiente pelos estímulos desse meio, sem ter consciência disso. Pela mente seletiva, diante do bombardeio de estímulos, são selecionados os aspectos de interesse ou que tenham chamado a atenção, e só aí é que ocorre a percepção (imagem) e a consciência (pensamento, sentimento), resultando em uma resposta que conduz a um comportamento”*.

A FIG. 2.6 modela graficamente o processo de percepção do ambiente e o comportamento.



FIGURA 2.6 – Modelo do processo percepção ambiental

FONTE: RIBEIRO, 2004.

Portanto, a percepção é a resposta aos estímulos captados através dos sentidos humanos. REID apud RIBEIRO (2004) escreveu que os sentidos têm uma dupla função: fazer-nos sentir e fazer-nos perceber. Segundo OKAMOTO apud RIBEIRO (2004), os sentidos são os receptores sensoriais que captam as informações existentes no ambiente, na superfície do corpo e no interior do próprio organismo. Além dos receptores externos, aqueles já difundidos como os cinco sentidos (visão, tato, olfato, audição, paladar), existem os sentidos internos, sentidos como o instinto de sobrevivência, o sentido do equilíbrio, do movimento, entre outros, que também influenciam no comportamento.

Os estímulos recebidos por todos os sentidos sensoriais são, até o momento da captação, apenas sensações. Só após a interferência da mente, que seleciona e destaca os estímulos recebidos pelos sentidos, eles passam a ser percebidos, ou seja, há a percepção propriamente dita. Através da consciência, a decisão é tomada e transformada em comportamento. As sucessões de percepções, que formam a experiência, caracterizam a atitude de um indivíduo. Assim, a atitude é formada por vários comportamentos, e representa uma postura cultural.

Para BINS ELY apud RIBEIRO (2004), a percepção é o ponto de partida de toda atividade humana. É a percepção, por exemplo, que nos fornece toda informação necessária para nossa orientação em um ambiente específico, e mais: *“Recebemos informações do meio ambiente ou das demais pessoas através de nossos sistemas de percepção: audição, visão, paladar/olfato, háptico¹ e equilíbrio. A visão é o sistema de percepção mais desenvolvido. Estas informações são tratadas através das atividades mentais, isto é, a compreensão das informações. Representações são construídas a partir de conhecimento adquirido, atribuindo significado aos elementos resultantes da análise perceptiva. Como resultado das atividades mentais tem-se decisão de ação, traduzidas no comportamento.”* Assim, considera-se o ambiente uma fonte de informações que o indivíduo utiliza para agir. Pode-se dizer então que o usuário faz uma leitura das informações fornecidas pelo ambiente.

¹O sentido háptico é aquele relativo ao tato, mas de uma maneira mais ampla. Pode-se chamar háptico, tudo aquilo que seja tátil, sentido pelo toque, como o toque de uma pessoa e a textura de uma roupa, e até mesmo o frio e o calor. Características do ambiente que influenciam no comportamento – desde a temperatura do ambiente, as questões do conforto físico, até a parte psicológica, questões como agradabilidade e espaço pessoal – são percebidos principalmente através do sentido háptico e leva o indivíduo a decidir quais atitudes tomar. Se o ambiente estiver frio, procura-se um agasalho ou sair do ambiente; se o ambiente estiver lotado de pessoas, procura-se um espaço livre que mais convém ao espaço pessoal.

LYNCH apud RIBEIRO (2004) coloca que o resultado da percepção, na qual quase todos os sentidos estão em operação, é a imagem mental do ambiente percebido. Ele fala então sobre a legibilidade do ambiente, da facilidade de reconhecimento e organização da informação obtida, e mais: *“Uma boa imagem ambiental oferece a seu possuidor um importante sentimento de segurança emocional. Ele pode estabelecer uma relação harmoniosa entre ele e o mundo à sua volta. (...) Na verdade, um ambiente característico e legível não oferece apenas segurança, mas também reforça a profundidade e a intensidade, potenciais da experiência humana”*.

Então, baseado nos autores citados, tem-se que a percepção ambiental (nesse trabalho delimitado como veículo) é aquela que leva o indivíduo a reconhecer o ambiente construído como realidade e vivenciá-lo. Através dos sentidos, o espaço é percebido e transformado em espaço simbólico, que é interpretado através da consciência e do pensamento (na qual está incluído todas as características do indivíduo) e o levará a uma tomada de decisão. Tem-se dessa forma, que a reação de conforto ou desconforto, prazer ou incômodo, é fruto de um processo complexo, multisensorial e relativo à leitura do ambiente.

GRIFFIN (1996) define isto como inter-subjetividade, ou seja, a diferença entre os indivíduos. A intra-subjetividade é a diferença no mesmo indivíduo em momentos diferentes.

Quando se fala em conforto veicular, não é fácil dizer qual é a parcela devida a percepção acústica e nem mesmo quais são todos os fatores que entram no julgamento do conforto de um veículo. Existem variáveis dinâmicas, como as vibrações e as reações dinâmicas do veículo, como acelerações e solavancos. Além disso, há os fatores espaciais, a acomodação do corpo sobre a poltrona, o espaço para as pernas e a facilidade dos movimentos necessários, a altura do volante e sua inclinação. Ainda entram os fatores como a temperatura, o barulho do motor, e outros. Como afirmam RIEMERSMA e MORAAL apud ROZESTRATEN (2006), não é muito claro se todas essas variáveis são avaliadas de maneira científica para se poder chegar a um julgamento final. Há também diferenças individuais, o que um julga aceitável outro acha intolerável. O grau de temperatura, a aeração e a ventilação são fatores importantes para tornar o ambiente no carro confortável, especialmente no Brasil. Os pneus e a suspensão por molas e amortecedores de fato amortecem muito os solavancos causados pela desigualdade do pavimento, tornando a viagem mais confortável para os passageiros e o motorista. Outro conforto é a direção hidráulica e o câmbio automático.

Por isso avaliar a percepção de conforto acústico no interior de um veículo não se trata de uma tarefa relacionada apenas ao sentido de audição e/ou do seu processamento e interpretação pela mente humana. É preciso considerar e avaliar a correlação das múltiplas informações recebidas por um usuário muitas vezes associadas aos sentidos visuais, hápticos, olfativos.

Nesse contexto cabe também questionar se a percepção de conforto acústico de um veículo, constituída por um conjunto de informações do ambiente deve ser abordada dentro de uma escala única ou por segmentação de mercado. A reprodução isolada (através de sistema de gravação) do ruído de um veículo econômico é realmente ou nitidamente inferior em qualidade quando comparada a outro de uma categoria superior? Como focar a melhoria do conforto acústico, se muitas vezes a percepção visual ou vibracional (tátil) são parcelas importantes na sensação de conforto e na maioria das vezes impossível de ser desmembradas? Essas questões envolvem muitos parâmetros subjetivos, mas importantes e que pretendem de alguma forma ser abordados no decorrer desse trabalho.

2.3.1 Conforto acústico

A sensação de conforto acústico dentro de um veículo está relacionada, principalmente, a dois fatores: às características dos sons emitidos pelo veículo e à forma como o ser humano percebe e julga esses sons. Tais fatores correspondem, respectivamente, às duas extremidades no processo de geração e percepção acústica. A última depende, em parte, do histórico do indivíduo em relação à sua experiência auditiva. Há indivíduos que são mais atentos aos sons que o veículo gera, outros não. O som do motor pode, por exemplo, parecer fascinante para um jovem. O som do movimento do retrovisor pode fazer os adultos se lembrarem dos antigos filmes de ficção científica. O som emitido pelo movimento do vidro pode incomodar bastante os mais críticos (BRIZON e MEDEIROS, 2010).

De fato o que poderia ser definido como agradável aos ouvidos? Responder essa pergunta torna-se uma tarefa um tanto quanto árdua, uma vez que a irritação ou prazer que acontece quando se está em contato com um determinado ruído é subjetivo e particular de cada indivíduo. Têm-se ruídos que afetam um grande número de pessoas, enquanto outros afetam um mínimo, seja ele bom ou ruim.

Se por um lado temos uma série de características da fonte de ruído como composição espectral, distribuição temporal, e os próprios níveis de intensidade, por outro temos uma gama de atributos fisiológicos e psicológicos particular de cada indivíduo na percepção do conforto (BISTAFA, 2006).

Promover o conforto acústico, que por definição significa garantir comodidade, bem-estar, aconchego no que se refere ao ouvido, a audição, ao som (adaptado de MICHAELIS, 2009), só é possível quando se admite uma abordagem ampla de todos esses conceitos.

ZWICKER e FASTL (1999) utilizaram conhecimentos de fisiologia, psicologia e acústica no desenvolvimento do estudo que hoje é conhecido como psicoacústica. Eles apresentaram parâmetros calculados a partir das características amostradas dos sinais sonoros que descrevem quantitativamente as sensações percebidas pelo aparelho auditivo humano, como aspereza, timbre e audibilidade.

Seguindo a linha de pesquisa com origem na psicoacústica, outras técnicas foram desenvolvidas. A mais difundida é a “Qualidade Sonora”, voltada para qualidade acústica do produto. As avaliações subjetivas também evoluíram com o tempo. A reprodução dos ruídos em laboratório utilizando sistemas de aquisição dedicados, que simulam a audição binaural², é uma ferramenta fundamental e permite que um júri avalie comparativamente diversas condições de um mesmo veículo ou encontre diferenças entre veículos (OTTO et al., 2001).

Expandindo o termo conforto acústico amplia-se o conceito apenas de bem-estar e agradável, trazendo para discussão questões funcionais como à capacidade de comunicação no interior do veículo e até mesmo a integridade da saúde dos ocupantes de um veículo.

Sabe-se, por exemplo, que a capacidade ou facilidade de comunicação no interior do veículo tem-se tornado uma necessidade cada vez mais inserida no setor automotivo dado o desenvolvimento e utilização de tecnologias sem fio para comunicação via celular.

² Audição binaural é uma técnica de gravação na qual são colocados dois microfones acoplados à cabeça de um manequim na posição das orelhas (binaural) e permite determinação da direção da origem dos sons.

O reconhecimento da fala é uma tecnologia presente nos veículos em lançamento e para isso o parâmetro subjetivo de inteligibilidade³ passa a ser fundamental. Na década de 80 o conceito de Índice de Articulação, um parâmetro objetivo para medir a inteligibilidade, foi inserido no Brasil (ONUSIC, 2001) e hoje constitui uma das principais ferramentas para análise e caracterização do conforto veicular.

No que se refere à saúde dos ocupantes, verifica-se que a maioria das pessoas passa algumas horas diárias no trânsito, entre o lar e o local de trabalho por exemplo. Para motoristas e taxistas a exposição é muito maior.

A diminuição do ruído emitido pelo veículo para seu interior é importante não apenas para a qualidade do produto, mas para a saúde dos usuários. Isso é ainda agravado porque parte do ruído percebido dentro do veículo é, também, proveniente do exterior (ruído externo gerado por outros veículos).

Pelo lado normativo apenas os limites de ruído externo gerado pelo veículo são regulamentados pelo CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) através da resolução 01/93 de 11 de Fevereiro de 1993. Entretanto, os limites de ruído interno não são regulamentados e são definidos pela concorrência entre os fabricantes e pelo nível de exigência do público para o qual o veículo foi desenvolvido (CARVALHO et al., 2003).

Estudos sobre o efeito do ruído no ser humano indicam que níveis de até 50 dB(A) provocam estresse e desconforto durável. Em torno de 65 dB(A) começa a degradação do organismo, podendo aumentar o desequilíbrio bioquímico e gerar outros riscos para a saúde. Exposição a ruídos de 80 dB(A) provoca liberação de morfina para o corpo, podendo criar um quadro de dependência. Em torno de 100 dB(A) pode ocorrer a perda da audição (NUNES, 2006). Em outra pesquisa, JIAN e HONG (2003) comprovou que o ruído interno, quando excede 75 dB(A), apresenta influência elevada nas capacidades de atenção e concentração do motorista.

³ Inteligibilidade da fala é um parâmetro psicológico (subjetivo) medido em percentagens de sílabas, palavras ou sentenças entendidas corretamente por um ouvinte em um universo de sílabas, palavras ou sentenças foneticamente balanceadas e emitidas por um orador, em um sistema de comunicação sob condições reais (ABNT NBR 12969, 1993).

Conforto acústico, capacidade de comunicação no interior do veículo e integridade física dos ocupantes são questões que devem ser trabalhadas de forma abrangente e integradas. Vale ressaltar que aliado a essas questões tem-se também que não é possível dissociar a percepção acústica da percepção vibracional, sendo essa última um importante parâmetro a ser considerado durante as avaliações.

De maneira simplificada, a correlação entre ruído, vibração e percepção humana está representada na FIG. 2.7.

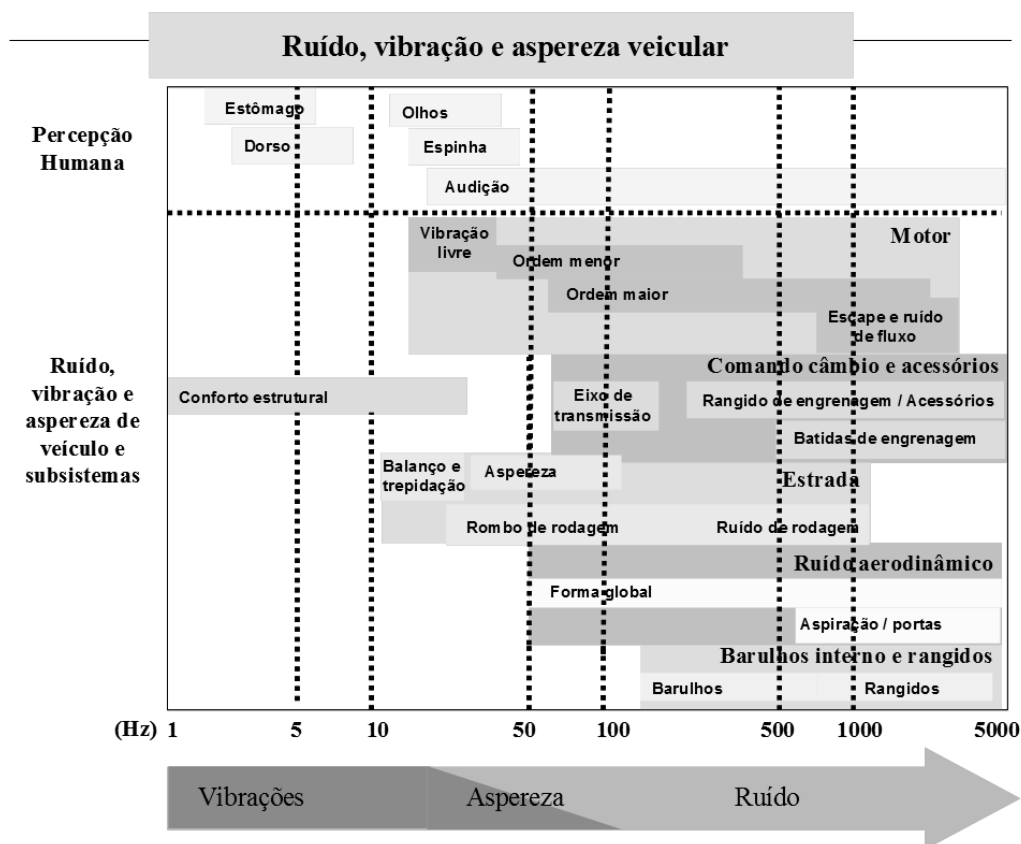


FIGURA 2.7 – Correlação entre ruído, vibração e percepção humana

FONTE: NVH – Fiat Automóveis S.A

2.3.2 Conforto vibracional

Ao se entender vibrações por movimentos oscilatórios, (GRIFFIN, 1996), pode-se dizer que a grande maioria das atividades humanas envolve algum tipo de vibração, como a respiração, que é associada a movimentos dos pulmões; o caminhar, que está diretamente relacionado com movimentos oscilatórios de pernas e braços; a fala e a audição.

Em máquinas, as vibrações também são inerentes ao seu funcionamento e podem gerar falhas ou fadigas nos materiais (resultantes das variações cíclicas), além de desgastar mais rapidamente componentes estruturais, gerando ruídos.

O ser humano é parte integrante de muitos sistemas de engenharia e a transmissão da vibração ao corpo pode levar a vários problemas nas pessoas. No caso da exposição humana ainda é preciso levar em conta efeitos psicológicos (GERGES, 1992). O corpo humano, por sua vez, também pode ser considerado como um sistema mecânico, e o estudo dos efeitos das vibrações no corpo envolve conhecimentos de engenharia, ergonomia, matemática, medicina, física, fisiologia e estatística (GRIFFIN, 1996).

O estudo dos efeitos da vibração sobre corpo humano é dividido basicamente em dois grupos:

- Vibrações de mãos e braços (VMB): vibração transmitida para o corpo através das mãos;
- Vibrações de corpo inteiro (VCI): corpo é suportado em uma superfície vibratória.

Existe uma grande dificuldade em se estudar os efeitos nocivos da VCI no corpo humano, pois é difícil fazer este tipo de exposição em laboratório. Usar cobaias muitas vezes é inviável, devido às diferenças não só em tamanho, mas estruturas anatômicas e fisiológicas muito diferentes.

A sensibilidade do corpo humano às vibrações depende de diversos fatores como postura corporal e tensões musculares, além da predisposição individual e das características das vibrações. CHAFFIN et al. (2001), consideram que o corpo humano tem em sua estrutura diferentes órgãos, tecidos e ligamentos que não respondem da mesma forma aos estímulos vibratórios. A resposta do nosso organismo poderá variar de acordo com características biomecânicas do corpo e também das características do estímulo, causando uma resposta mecânica, sensitivo-motora e/ou psicológica.

Na FIG. 2.8 são identificadas algumas das variáveis que podem influenciar na sensibilidade do corpo humano às vibrações e no QUADRO 2.1 são descritas as faixas de frequências relacionadas com a estrutura do corpo que sofrerá maior estímulo, assim como exemplificado alguns fatores causadores desta vibração.

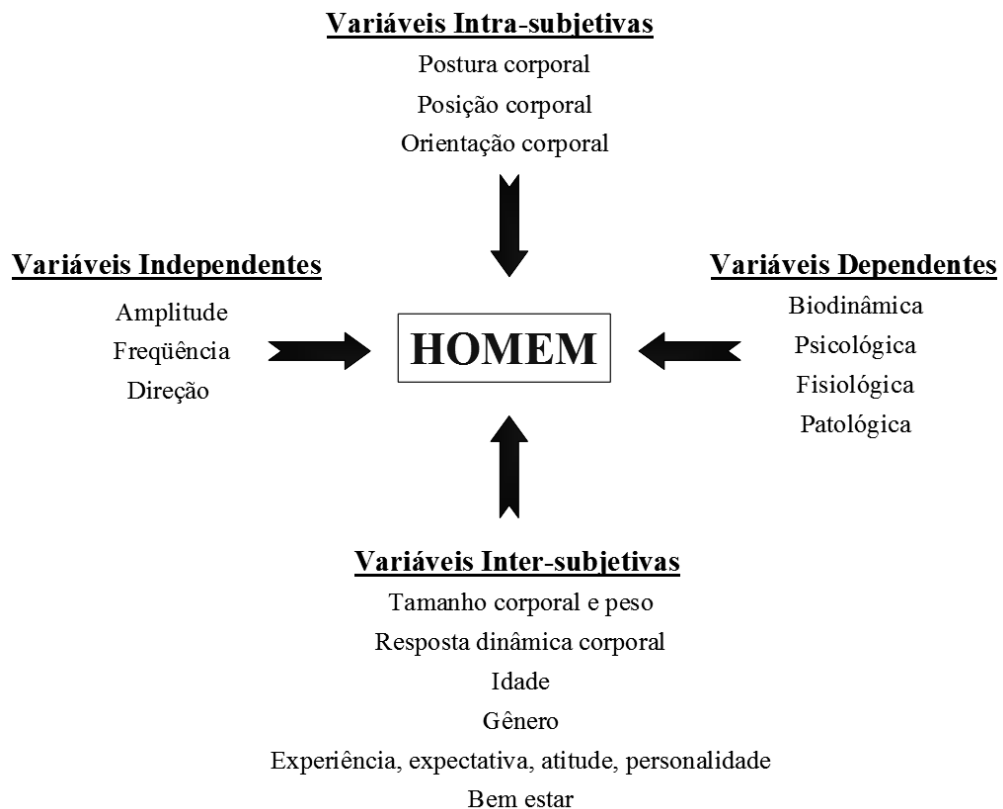


FIGURA 2.8 – Variáveis que influenciam na percepção de vibração no corpo humano

FONTE: FIAT, 2006

QUADRO 2.1 – Sensibilidade dos sistemas humanos à vibração

Intervalo de frequência	Frequência	Sensibilidade	Fator causador da vibração
Baixa	0 a 1-2 Hz	Sistema vestibular	Navios, guindastes e aeronaves
Média	2 a 20-30 Hz	Biomecânica: ressonância dos tecidos corporais	Veículos e aeronaves
Alta	20 a 300 Hz	Mecanorreceptores somestésicos dos músculos, tendões e tecidos cutâneos	Ferramentas e maquinário

FONTE: CHAFFIN et al., 2001.

Informações precisas sobre as VCI permitem conhecer o ambiente ocupacional dos trabalhadores e a resposta humana a este ambiente, (GRIFFIN, 1996). GRIFFIN (1996) divide os efeitos de VCI na saúde em agudos e crônicos, sendo que os agudos são imediatamente após a exposição e os crônicos decorrentes de situações de exposição mais prolongada, como um efeito cumulativo de meses ou anos.

Pode-se citar diversos problemas de saúde associados à exposição a vibrações mecânicas, como problemas ortopédicos, cardiovasculares, respiratórios, problemas nas articulações, circulação sanguínea, entre outros. De modo geral as VCI podem afetar (GRIFFIN, 1996):

- a resposta subjetiva: causando desconforto, dor, etc;
- perturbação da atividade: visão, controle dos movimentos das mãos, controle dos movimentos dos pés, etc;
- efeitos nocivos: problemas da coluna, sistema respiratório, etc;
- mal do transporte: náusea, vômito, redução do desempenho, etc.

Os efeitos nocivos mais conhecidos e pesquisados relacionados à exposição à VCI são problemas de coluna, em especial a dor lombar (GRIFFIN, 1996, SORAINEN et al, 1998, LENZUNI e PIERONI, 2003, PALMER et al, 2000, GOGLIA e GRBAC, 2005 e MABBOTT et al, 2001). Queixas relacionadas a problemas de coluna como: dor, deslocamento de discos intervertebrais, degeneração da coluna vertebral e osteoartrite, foram reportadas em GRIFFIN (1996). VCI transientes na direção vertical, testadas em diversas frequências e intensidades podem causar desconforto, variando de acordo com a amplitude do estímulo (MATSUMOTO e GRIFFIN, 2005). A exposição medida em máquinas de corte de madeira (“framesaw”) quando em valores superiores ao permitido pela norma ISO 2631-1 (1997) registra aumento nas queixas de problemas sérios na coluna. Desta forma, GOGLIA e GRBAC (2005) recomendam uma exposição máxima diária de 4 horas para esses equipamentos.

A maioria das publicações que buscam associar a exposição a VCI a dor lombar apresentam resultados questionáveis em vários aspectos, levando a conclusões dúbias se de fato existe uma relação direta exposição-dor, ou apenas uma combinação de fatores, como posturas viciosas (KITUSAMY e BUCHHOLZ, 2006 e LINGS e YDE, 2000).

Apesar disso, muitos achados levam a acreditar em claras evidências do aumento do risco de dor lombar em indivíduos expostos a vibrações, devido à fadiga muscular causada pela sobrecarga mecânica imposta à coluna vertebral (BOVENZI e HULSHOF, 1999).

MABBOTT et al. (2001), em seu estudo, mostraram que motoristas sofrem de fadiga e ainda consideraram como queixas relacionadas à exposição: desordens nas articulações, músculos; desordens da circulação sanguínea; alterações cardiovasculares, respiratórias, endócrinas e metabólicas; problemas no sistema digestivo; dano reprodutivo em mulheres; prejuízo na visão e/ou equilíbrio; interferência com atividades; desconforto; dor lombar por degeneração vertebral precoce, além de fadiga muscular e rigidez.

Irritabilidade, problemas de visão, deformações lombares e problemas digestivos foram citados por SANTOS FILHO et al. (2003).

Vale destacar que é preciso que o indivíduo seja exposto a VCI durante vários anos para ocorrerem mudanças em seu estado de saúde e ainda deve-se considerar o caráter subjetivo dos indivíduos quando se trata de desconforto (FERNANDES e MORATA, 2002). Ao se utilizar VCI em pesquisas sobre saúde em geral, os autores precisam definir três parâmetros característicos das VCI, a saber: a amplitude, a duração e a frequência, que caracterizarão o movimento e induzirão respostas diferenciadas de acordo com os parâmetros selecionados.

Segundo a DIRETIVA EUROPÉIA 2002/44/EG (2002), para se evitar problemas de saúde em exposições a vibrações, deve-se ter em mente dois valores distintos: o valor de exposição para a ação ou EAV (“Exposure Action Value”) e o valor de exposição limite ou ELV (“Exposure Limit Value”) que são estabelecidos de acordo com o tipo de agente causador da vibração, ou seja, VCI ou VMB. O EAV é o valor total de exposição diária a partir do qual o empregador deve tomar medidas preventivas e implementar programas para redução dos níveis de vibração. Para VCI, o valor do EAV é de $0,5 \text{ m/s}^2$ para 8 horas de exposição. O ELV refere-se a níveis que, segundo a diretiva, em nenhuma situação devem ser excedidos para uma exposição total diária de 8 h. Para VCI, o valor de ELV é de $1,15 \text{ m/s}^2$ para 8 horas de exposição.

Apesar de a diretiva europeia fixar valores de EAV e ELV para 8 horas de exposição, é possível se estimar a aceleração r.m.s. ponderada para um dia de trabalho de 8 horas, considerando-se dados de exposição obtidos para menos de 8 horas. Para tal, se assume que a resposta humana é relacionada à energia e que a exposição é mantida constante durante o dia de trabalho.

Ao se referir ao conforto vibracional veicular para um ocupante que utiliza seu produto para fins particulares como deslocamentos para o trabalho, lazer, etc., o conceito de valores e / ou doses de vibração pode se tornar limitado, visto que a percepção de vibração como desconforto pode estar associada a uma série de outros parâmetros quantitativos e qualitativos que devem ser considerados e não podem ser desassociados do estímulo puramente vibracional.

Na FIG. 2.9 são exemplificados alguns parâmetros objetivos e subjetivos que devem ser considerados em uma avaliação de percepção de vibração do volante de direção.

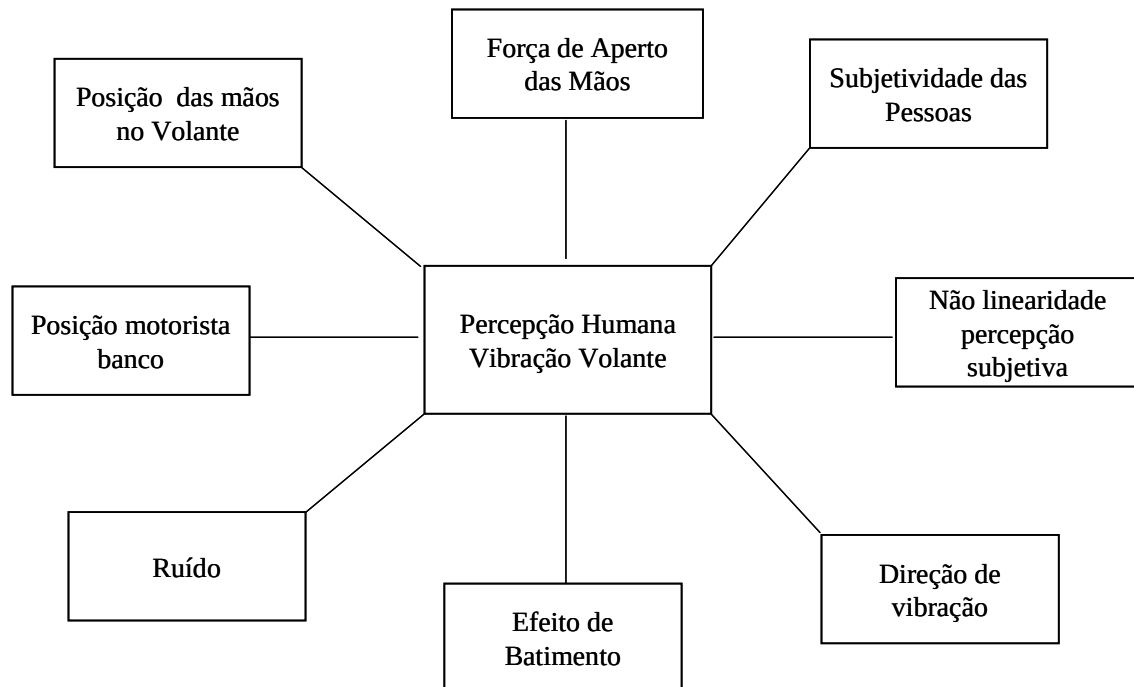


FIGURA 2.9 – Fatores que afetam na percepção de vibração do volante

FONTE: NVH – Fiat Automóveis S.A.

Em cada um desses fatores destacam-se as variáveis já identificadas na FIGURA 2.8. Pode-se afirmar, por exemplo, que a força de aperto das mãos está relacionada à variável fisiológica que representa as fibras neurotransmissoras das mãos. Já a posição do motorista no banco está relacionada à variável intra-subjetiva postura / posição corporal, na qual o estado de tensões musculares pode influenciar na percepção de vibração (CHAFFIN et al. (2001)).

GIACOMIN e FUSTES (2005) em estudos na área veicular investigaram a equivalência subjetiva entre ruído e vibração do volante. Em um de seus experimentos 20 pessoas foram submetidas a diferentes estímulos de vibração e ruído simultaneamente em um simulador que reproduz condições reais de estradas. Em níveis de ruído e vibração do volante próximos dos encontrados em regime estacionário (marcha lenta), os resultados demonstraram que 75% das pessoas avaliadas consideram a vibração como fator mais desagradável que o ruído (GRAF. 2.1).

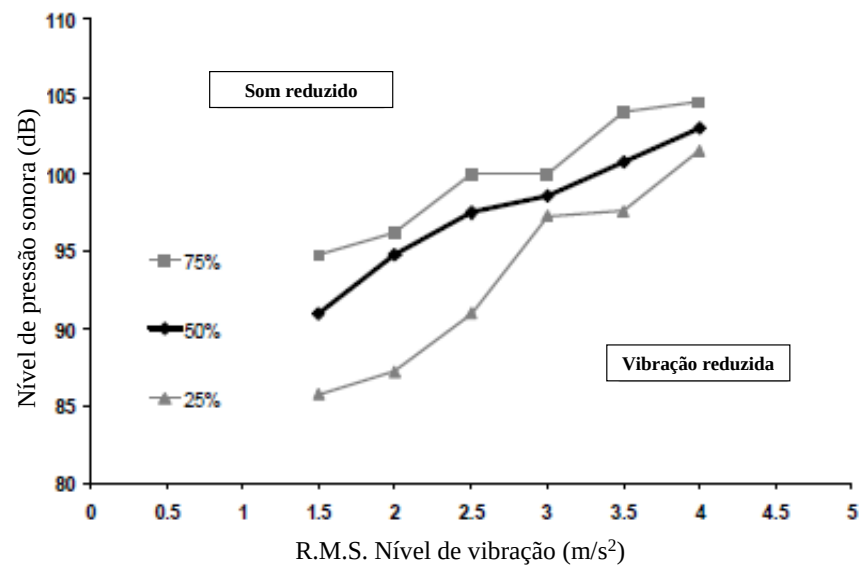


GRÁFICO 2.1 – Preferência à estímulos sonoros reduzidos x nível de vibração (%)

FONTE: GIACOMIN e FUSTES, 2005.

3. QUALIDADE SONORA

Nesse capítulo três assuntos são discutidos com o objetivo de ilustrar alguns parâmetros que devem ser considerados para compreensão do conceito de qualidade sonora. Primeiramente, é descrito o sistema auditivo com suas respectivas considerações fisiológicas envolvidas no mecanismo de audição. No segundo momento, são apresentados parâmetros essenciais para a compreensão da sensação subjetiva no que se refere ao estímulo sonoro. Por último, são identificadas algumas métricas e parâmetros acústicos que serão utilizados na metodologia desse trabalho para correlação entre avaliações subjetivas e objetivas.

3.1 Visão geral

Por décadas, engenheiros acústicos de desenvolvimento de produto estiveram engajados em reduzir a energia acústica emitida pelo produto. A lógica para os esforços, em termos dos níveis de emissão, era quanto mais silencioso melhor (BLAUERT e JEKOSCH, 1997).

Aos poucos a avaliação sonora passou a ser relacionada com a satisfação do cliente, sendo essa última considerada como critério definitivo para a qualidade a ser julgada, como foi o caso na indústria automobilística. Entretanto, não foi somente o consumidor final do produto, o cliente, que ganhou um voto no ciclo de qualidade. O conceito se estendeu e passa a ser ilustrado nesse momento através de vários exemplos: Do ponto de vista de engenheiros de “product-sound”, os sons possuem melhores qualidades quando podem ser projetados e implementados; para o ponto de vista dos economistas, os sons têm maior qualidade quando podem ser economicamente viáveis; já para o ponto de vista da sociedade, tais sons tem melhor qualidade quanto menos interfira com o ambiente (BLAUERT e JEKOSCH, 1997)

Na área automobilística a melhoria do conforto acústico tem sido uma das áreas na qual a qualidade sonora tem se tornado um elemento padrão no desenvolvimento do projeto. Um esforço considerável é dedicado em pesquisas para analisar e descrever as características perceptuais dos sons automotivos, correlacionar a percepção subjetiva com a avaliação e medições objetivas, e desenvolver a instrumentação e ferramentas necessárias para análise de sinais.

Para MATHIAS et al. (1995) o objetivo do design de qualidade sonora é o de alcançar o som veicular ideal no máximo de condições operacionais possíveis. O desafio da obtenção da boa qualidade sonora consiste em transferir o som ideal (objetivo) em prática efetiva para um aceitável custo-benefício.

A primeira consideração ao tratar do subjetivo conceito de qualidade sonora é descrever a característica perceptual dessa qualidade por meio de testes de júri ou métricas apropriadas. Em outras palavras, é buscar um entendimento do que a qualidade sonora realmente é e como essa pode ser descrita.

Segundo AUWARAER et al. (1996) existem alguns passos consecutivos a serem seguidos para um processo de engenharia de qualidade sonora, são eles:

- Avaliação da qualidade sonora;
- Diagnóstico da qualidade sonora e identificação do problema;
- Identificação do problema físico e modelagem;
- Solução de engenharia de qualidade sonora.

Para uso prático, no entanto, a função de análise de sinal tem sido empregada para calcular e avaliar um número de parâmetros, os quais se supõem estarem relacionados com a qualidade sonora. Em muitos casos práticos, visto a relativa importância dos parâmetros aplicáveis para as dimensões perceptuais, uma análise estatística é realizada para correlacionar o resultado da avaliação subjetiva com uma combinação de métricas de qualidade sonora. (AUWARAER et al., 1996).

O próximo passo é entender porque o som possui uma qualidade particular. Quando métricas apropriadas são aplicadas na fase de avaliação, informações iniciais já podem ser obtidas. Nesta fase, temos que a característica da qualidade sonora pode ser associada a uma propriedade do sinal, como por exemplo, a um evento temporal específico, a uma componente espectral, ou a uma ordem de contribuição. Uma vez que o problema da qualidade sonora pode ser caracterizado, como próximo passo é feita uma análise da possível fonte, componente ou parâmetros vibroacústicos. Isso exige a correlação do sinal acústico com a resposta física, projeto de sinais orientados ou fenômenos.

AUWARAER et al. (1996) agrupou várias técnicas para esta finalidade, de forma a serem agrupadas por categorias, como mostradas a seguir:

- **Análise de correlação:** que considera a relação com os efeitos de uma fonte ou componente particular. Nesta categoria, os componentes críticos do sinal sonoro são relacionados a outros sinais mensuráveis que são mais ligados as causas físicas do problema.
- **Análise do caminho de transferência:** que considera a contribuição de diferentes espaços abertos e /ou fontes de estrutura de suporte para a resposta sonora.
- **Análise numérica e experimental:** que considera as características próprias do sistema da estrutura e do espaço acústico.

Com a identificação do problema de qualidade sonora e a compreensão de sua relação com os fenômenos acústicos parte-se então para uma solução de engenharia.

Quando as técnicas discutidas por AUWARAER et al. (1996) são usadas para determinação das fontes, caminhos de transferência e propriedades do sistema mecânico-acústico, o modelo construído poderá ser aplicado também para desenhar e validar soluções. Basicamente, isso é feito através da re-síntese do som após a modificação de alguns elementos e, então, reavaliando ele subjetivamente, através de sessões de escuta ou através de métricas objetivas.

A qualidade de ruído do veículo é uma questão muito importante para ser abordada em vários estágios do desenvolvimento e refinamento do carro. Uma sistemática consistente para relacionar a avaliação da qualidade sonora com as características física e estrutural das varias fontes de ruído e propriedades do sistema vibroacústico do veículo e de seus componentes é essencial para usar a qualidade sonora não somente como um conceito para avaliação sonora, mas como um parâmetro integrado no projeto de um veículo.

Essa visão também é compartilhada com GUSKI (1997) o qual afirma que o desempenho acústico de um veículo e o melhoramento de seu conforto sonoro é um dos maiores campos no qual a qualidade sonora tem se mostrado como um conceito padrão na fase de projeto.

Já para KANG e BYUN (2010), primeiramente a meta de qualidade sonora é estabelecida de forma que o veículo fique em harmonia com a identidade global do veículo e a imagem passada pela marca. Em segundo lugar, a meta de qualidade sonora interior é, então, transferida para o nível do sistema fazendo o uso da análise de TPA (“Transfer Path Analysis”), em que a fonte de contribuição e os caminhos de transferência são identificados.

3.2 Avaliação da qualidade sonora

Segundo GUSKI (1997) existe um aspecto da qualidade sonora que se refere a sua suavidade (amenidade) ou ao incômodo. Desagradável e incômodo são relacionados, mas não são termos idênticos. O exato significado deles depende da linguagem usada. Em geral, o termo desagradável se refere a uma avaliação instantânea de uma situação, enquanto que, incômodo refere-se a conceitos mais amplos – tanto em alcance como em significado no que diz respeito ao domínio no tempo.

Desagrado e perturbação podem ser medidos por meio de itens de um questionário com uma escala de respostas apropriada. Geralmente, indivíduos são solicitados a escutar sons ou lembrar os sons e usar quadro numérico e/ou verbal de referência, o qual tem sido analisado por suas propriedades numéricas bem como sua aplicabilidade, confiabilidade de validade. É sabido que as escalas psicológicas não são arbitrárias; elas precisam de uma formulação adequada e formato de resposta (GUSKI, 1997).

No trabalho desenvolvido por BLOMMER et al. (1997), em que se pretendia avaliar o efeito do som de um sistema de propulsão na percepção do desempenho do veículo, foi utilizado dois tipos de avaliações subjetivas diferentes conhecidas como avaliação de comparação pareada e avaliação de diferencial semântico, descritas respectivamente nos tópicos abaixo:

- Avaliação de comparação pareada: esse tipo de avaliação foi realizada com o objetivo de determinar quais combinações de níveis sonoros em termos de intensidade e aspereza contribuíam para a percepção do desempenho. A comparação pareada de nove sons foram apresentados de forma aleatória para os avaliadores. Para cada par de sons os indivíduos foram pedidos para selecionar aquele que lhe transmitiu uma melhor impressão de desempenho.

- Avaliação por diferencial semântico: essa avaliação foi realizada com o objetivo de determinar se existiam diferenças perceptíveis nos sons baseada em quatro configurações de adjetivos bipolares: alto/baixo; fraco/forte; suave/áspero e conservativo/esportivo. Os indivíduos foram pedidos para avaliar todos os nove sons baseado em uma escala dividida em sete pontos, sendo um extremo “muito baixo” e o outro “muito alto”.

Diversas outras formas de se avaliar a qualidade sonora de produtos têm sido utilizadas nos estudos da área. Além das mencionadas acima poderiam ainda ser citadas: as avaliações através de uma escala arbitrária no qual o voto é dado em condições absolutas; entrevistas abertas ou interativas que normalmente são baseadas na preparação e aplicação de um questionário padrão; monitoramento comportamental ou fisiológico que se baseiam fundamentalmente no processo de observação a demonstrações de reações externas e biológicas respectivamente; etc.

No setor automobilístico um método de avaliação merece destaque. Trata-se de uma avaliação absoluta realizada em uma escala de 1 a 10 desenvolvida pela SAE (“Society of Automotive Engineers”), na qual a nota mínima de aprovação é 6 e 10 a maior e melhor nota para o desempenho do produto no quesito avaliado. É um método utilizado em avaliações experimentais subjetivas, não apenas relacionados à qualidade sonora, na qual é empregada a comparação a um atributo pré-definido expresso de forma oral (intenso, agradável, etc.).

Apresenta-se também em forma de uma tabela interpretativa que associa os vários pontos lançados com graduações do tipo estéticas (do intolerável ao excelente), de relevância perceptiva (do evento notado por todos os observadores ao evento imperceptível) e do tipo lógica do limiar (inaceitável, linha limite e aceitável) (QUADRO 3.1).

QUADRO 3.1 – Escala SAE

		ESCALA DE AVALIAÇÃO SUBJETIVA									
ESCALA NUMÉRICA		INACEITÁVEL				ACEITÁVEL					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SIGNIFICADO		MUITO DEFICIENTE	DEFICIENTE	POBRE	MEDIOCRE	LIMITE DE ACEITAÇÃO	ACEITÁVEL	ADEQUADO	BOM	MUITO BOM	EXCELENTE
CHAVE	NÍVEL DE PERCEPÇÃO	ALTA			MODERADA			PEQUENA		MUITO PEQUENA	NENHUMA
DE	CLASSE DE CLIENTES	TODOS OS CLIENTES	CLIENTES MÉDIOS			CLIENTES CRÍTICOS		CLIENTES ESPECIALISTAS			
INTERPRETAÇÃO	SENSAÇÃO	INTOLERÁVEL			INCÔMODO		LEVE INCÔMODO	PEQUENO DESCONFORTO		NENHUM DESCONFORTO	NENHUMA SENSÇÃO
	REAÇÃO	REJEITA		PROTESTA			ACEITA			NENHUMA	
AÇÃO CORRETIVA NECESSÁRIA		INTERVENÇÃO RADICAL E IMEDIATA		INTERVENÇÃO MELHORATIVA EFETUADA RAPIDAMENTE			REQUER MELHORIA	REQUER UMA MELHORIA MAS NÃO URGENTE		OK	

FONTE: NVH – Fiat Automóveis S.A

Os métodos de avaliação apresentados são apenas algumas formas de se expressar a avaliação subjetiva sobre a qualidade sonora percebida por uma pessoa. O método de avaliação através da escala SAE, o mais utilizado no âmbito automobilístico, é uma boa ferramenta para avaliação subjetiva, uma vez que as chaves de interpretação podem vir a auxiliar na escolha da nota através dos parâmetros de percepção, sensação e reação.

Pode dizer que como um método puramente subjetivo, os resultados obtidos pouco contribuem ou podem ser utilizados como informação para desenvolvimento da qualidade sonora de um produto. Seja pelo seu próprio conteúdo, resultado de uma avaliação subjetiva individual, ou pela sua natureza, com todas as variações pertinentes a condição do avaliador como ser humano.

É dessa forma, que se ressalta o conceito já mencionado de que a qualidade sonora extrapola apenas o limite de uma avaliação subjetiva. A qualidade sonora deve ser entendida como um sistema de três pilares, no qual é considerado a combinação de dados objetivos mensurados, dados calculados (psicoacústica) e resultados das avaliações subjetivas. É justamente nesse contexto, que a proposta desse trabalho é desenvolvida, buscando um índice de conforto que não represente apenas uma avaliação subjetiva, mas que traga em seu conteúdo parâmetros objetivos que possam efetivamente contribuir no projeto de desenvolvimento de novos produtos.

3.3 Mecanismos de audição

3.3.1 O sistema auditivo

O sistema auditivo do homem pode ser dividido em três regiões: a do ouvido externo, do ouvido médio e do ouvido interno (FIG. 3.1).



FIGURA 3.1 – Sistema auditivo humano

FONTE: site:www.corpohumano.hpg.ig.com.br/aprsensoriais/ouvido/ouvido.html

O ouvido externo é composto pela orelha, que é um órgão especializado em concentrar as ondas sonoras na cavidade do ouvido, e pelo canal auditivo. Este é um tubo de mais ou menos 3 cm de comprimento, fechado na parte interna pelo tímpano.

Na parte interna do tímpano está o ouvido médio, que é conectado ao fundo da garganta pelo tubo de eustáquio para que as mudanças na pressão atmosférica sejam equalizadas dos dois lados do tímpano e não causem distorção na atuação deste (FIG. 3.2).

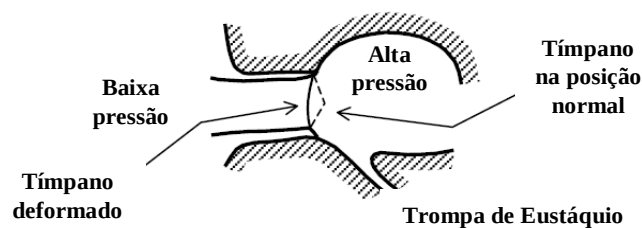


FIGURA 3.2 – Ouvido médio

FONTE: MIYARA, 2003

O ouvido médio é composto de três ossículos: o martelo, a bigorna e o estribo, conectados entre si. Estas conexões não são rígidas. O martelo é conectado ao tímpano para se mover com ele. Do outro lado, o estribo está conectado a uma membrana chamada janela oval (FIG. 3.3).

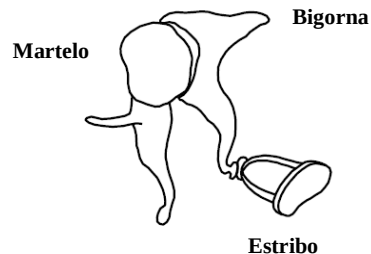


FIGURA 3.3 – Ouvido médio

FONTE: MIYARA, 2003

O ouvido interno é a porção do ouvido que está além da janela oval. Consiste em parte de uma cavidade na estrutura óssea do crânio, chamada cóclea, cuja forma lembra um caracol, com quase três voltas. A cóclea é preenchida por um fluido incompressível chamado perilinfa, e dividida ao meio em sua largura por uma repartição chamada membrana basilar (FIG. 3.4).

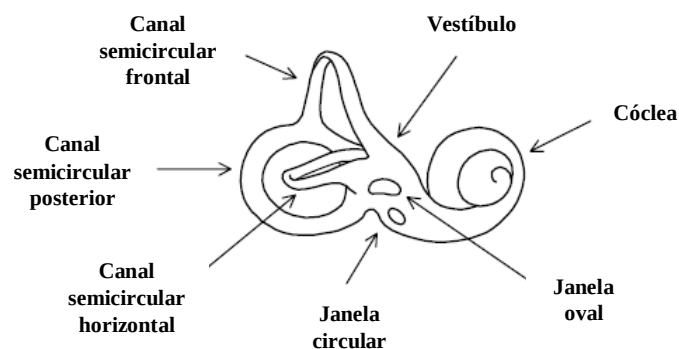


FIGURA 3.4 – Ouvido interno

FONTE: MIYARA, 2003

A divisão proporcionada por esta membrana forma dois compartimentos longos, um dos quais é ligado aos ossículos do ouvido médio pela janela oval. O outro compartimento é separado do ouvido médio pela janela circular. Os dois compartimentos estão interconectados por uma pequena abertura na membrana basilar no final de sua extensão, na extremidade da cóclea que é chamada de ápice. A outra extremidade deste órgão, conectada ao ouvido médio é chamada de base (FIG. 3.5).

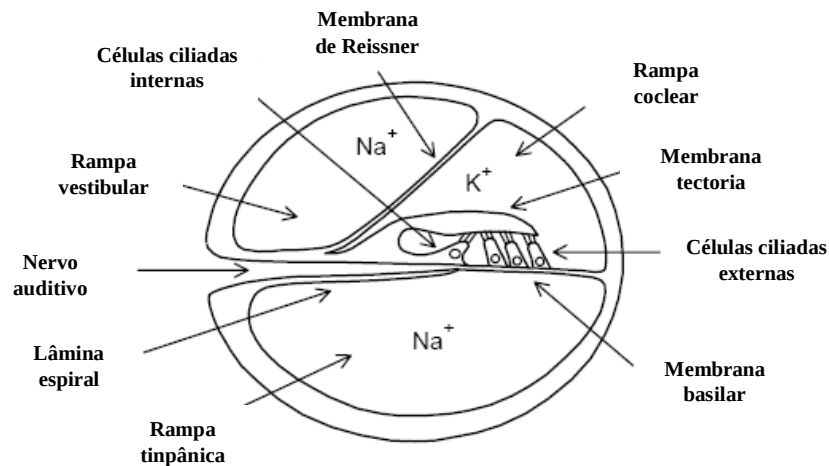


FIGURA 3.5 – Membrana basilar

FONTE: MIYARA, 2003

Milhares de conexões nervosas estão ligadas à membrana basilar, que, recebendo os distúrbios mecânicos, transmitem informação ao cérebro. O conjunto de células que respondem aos estímulos mecânicos da membrana basilar, transformando-os em impulsos nervosos é chamado de órgão de Corti (FIG. 3.6).

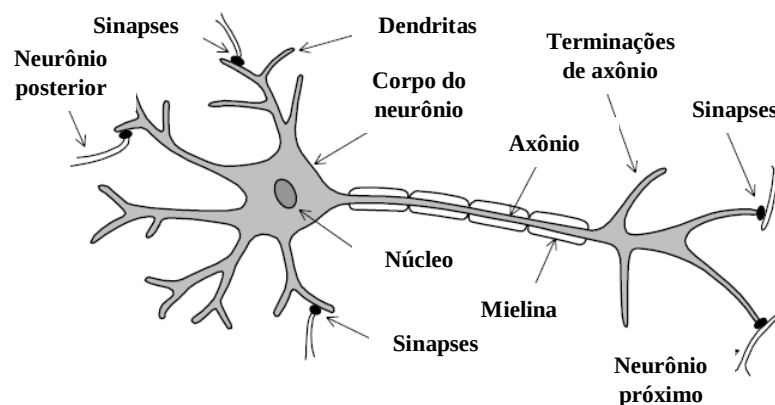


FIGURA 3.6 – Órgão de Corti

FONTE: MIYARA, 2003

A FIG. 3.7 ilustra o processamento do som nos seres humanos. As informações no nível físico do som, na forma de ondas sonoras, são captadas, processadas e codificadas em nível fisiológico pela orelha, e enviadas ao cérebro pelas fibras nervosas auditivas. No nível psíquico, o cérebro interpreta as informações recebidas e determina seu significado e importância.

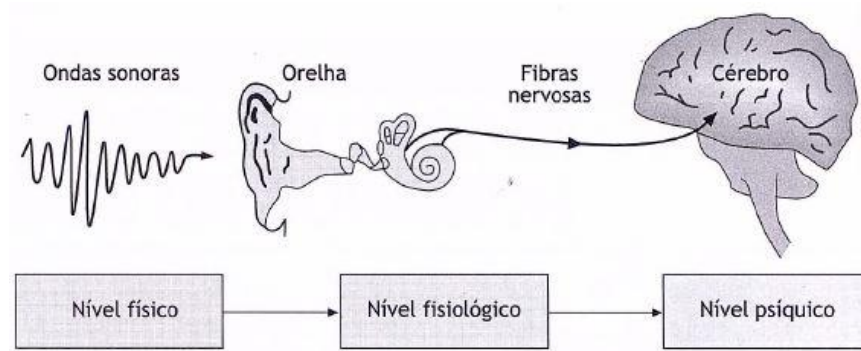


FIGURA 3.7 – Processamento do som nos seres humanos

FONTE: BISTAFA, 2006.

3.3.2 Fisiologia da audição

3.3.2.1 Audição Via Aérea

O processo fundamental da audição é a transformação do som em impulsos elétricos ao cérebro. Esse processo passa pelas seguintes etapas (FERNANDES, 2009):

- As ondas sonoras chegam até o pavilhão auditivo e são conduzidas ao canal auditivo (meato acústico externo). Além de conduzir o som ao canal auditivo, o pavilhão auditivo também ajuda na localização da fonte sonora.
- As ondas sonoras percorrem o canal auditivo e incidem sobre o tímpano (membrana timpânica), fazendo-o vibrar com a mesma frequência e amplitude da energia do som. As ondas sonoras (pressão) são transformadas em vibração.
- A vibração do tímpano é transmitida para o cabo do martelo que faz movimentar toda a cadeia ossicular.
- A vibração do martelo é transmitida para a bigorna e para o estribo, através de um sistema de alavancas que aumentam em 3 vezes a força do movimento, diminuindo em 3 vezes a amplitude da vibração.
- A vibração da platina do estribo é transmitida sobre a janela oval, que está em contato com o líquido do ouvido interno. A vibração é transformada em ondas de pressão no líquido. Como a relação entre as áreas do tímpano e da janela oval é de 14:1, ocorre uma nova amplificação do som pela redução da área.
- A vibração no líquido da cóclea é, portanto, uma onda sonora (longitudinal) semelhante à onda sonora que chegou ao pavilhão auditivo, com a mesma frequência, porém com a amplitude reduzida de 42 vezes (3×14) e a pressão aumentada de 42 vezes.

- As ondas sonoras se propagando nos líquidos do ouvido interno provoca a vibração da membrana basilar e do órgão de corti. A vibração chega até as células ciliadas, fazendo com que seus cílios oscilem saindo de sua posição de repouso.
- A oscilação dos cílios (na mesma frequência da onda sonora original) causa uma mudança na carga elétrica endocelular, provocando um disparo de um impulso elétrico para as fibras nervosas que é conduzido para o nervo acústico e para o cérebro.
- A indicação de qual célula ciliada irá responder ao estímulo vibratório depende da frequência do som: para sons agudos o deslocamento da membrana basilar é maior na região basal (próxima à janela oval) estimulando as células desta região; se o som é grave, o movimento maior da membrana basilar será na região apical.

Um importante mecanismo de proteção ocorre no ouvido médio. Quando o estímulo sonoro atinge níveis acima de 70 - 80 dB o processo de proteção é ativado, estimulando a contração do músculo estapédio (através do nervo facial), que faz alterar a forma de vibração do estribo sobre a janela oval. A platina do estribo passa a vibrar paralelamente à membrana da janela oval, impedindo a transmissão da vibração e inclusões muito pronunciadas que poderiam romper esta membrana (FERNANDES, 2009).

3.3.2.2 Audição Via Óssea

As vibrações da energia sonora podem chegar ao ouvido interno (cóclea) através dos ossos do corpo humano, principalmente da caixa craniana. Um exemplo disto é o barulho que escutamos quando mastigamos ou coçamos a cabeça.

A audição por via óssea acontece quando as ondas sonoras chegam até os ossos da cabeça, fazendo-os vibrar. Esta vibração é conduzida pelos ossos até os ossículos do ouvido médio e diretamente até a cóclea, provocando ondas nos líquidos internos e provocando a sensação da audição. A audição por via aérea é muito mais sensível que por via óssea; como exemplo, se nós eliminássemos a audição aérea de uma pessoa, ela escutaria um nível sonoro com, aproximadamente, 60 dB de atenuação.

Estudos demonstram que os ossos do crânio vibram de forma diferente para diversas bandas de frequência. Para sons graves, próximos a 200 Hz, o crânio vibra como um corpo rígido. Para frequências em torno de 800 Hz a caixa craniana se deforma na direção anterior

posterior, e para 1500 Hz a deformação é lateral. Outro mecanismo importante na audição por via óssea é a vibração que chega ao ouvido através da mandíbula, que é ligada diretamente no osso temporal (FERNANDES, 2009).

3.3.3 Sensação subjetiva

O som é caracterizado por grandezas físicas, enquanto que as sensações são caracterizadas por grandezas psicoacústicas. É o sistema auditivo que transforma sons em sensações psíquicas. O objetivo é entender as grandezas psicoacústicas mais importantes e suas relações com as grandezas físicas do som (QUADRO 3.2).

QUADRO 3.2 – Transformação do som em sensações psíquicas pelo sistema auditivo

Som →	Sistema auditivo	Sensações →
Grandezas físicas		Grandezas psicoacústicas
Nível sonoro		Audibilidade
Frequência		Tonalidade

FONTE: BISTAFA, 2006

Entretanto, no desenvolvimento de grandezas psicoacústicas, uma das principais tarefas está em determinar a variação mínima da grandeza física capaz de provocar uma variação apenas perceptível da sensação subjetiva. Essa variação recebe o nome de diferença apenas perceptível ou JND “Just noticeable difference”), ou limiar diferencial.

No que se refere ao limiar diferencial do nível de pressão sonora a variação mínima detectável pelo sistema auditivo é aproximadamente de 1 dB. Na realidade, esse limiar diferencial é aquele que se verifica aproximadamente para sons de baixo nível sonoro, em torno de 30-40 dB, e nas médias e altas frequências. Para sons de níveis sonoros elevados, indiferentemente da frequência o limiar do nível de pressão sonora é de apenas 1/3-1/2 dB (GRA. 3.1) (BISTAFA, 2006).

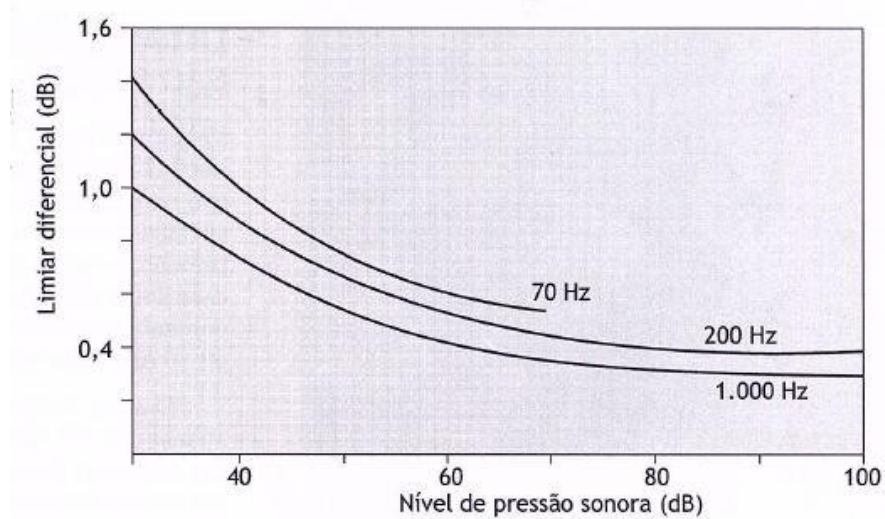


GRÁFICO 3.1 – Limiar diferencial do NPS x tons puros

FONTE: BISTAFA, 2006.

No GRA. 3.2 observa-se que o sistema auditivo é bastante sensível a variações de frequência. O limiar diferencial para tons puros com frequências abaixo de 500 Hz é aproximadamente 2-3 Hz. Para tons puros com frequências acima de 500 Hz, o limiar relativo está em torno de 0,5%.

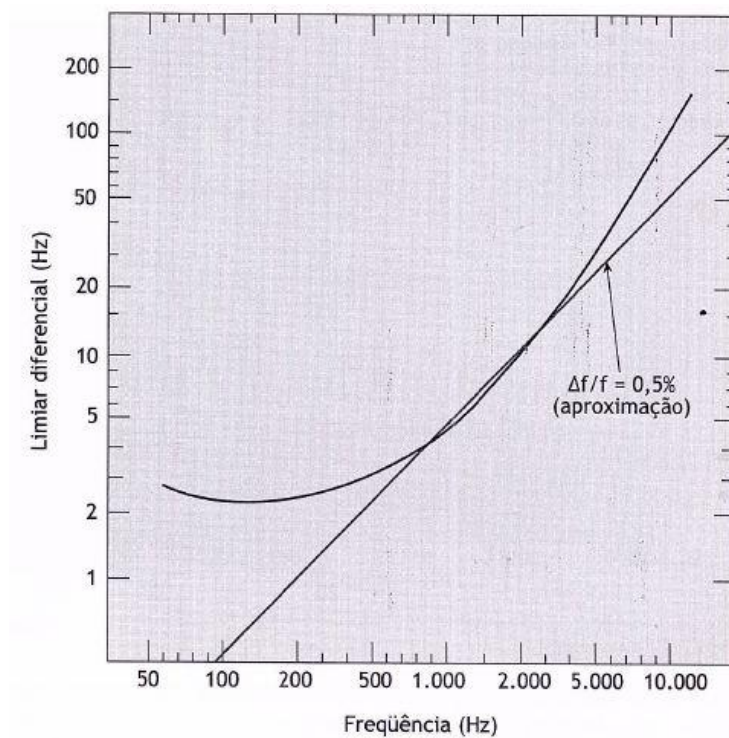


GRÁFICO 3.2 – Limiar diferencial da frequência para tons puros

FONTE: BISTAFA, 2006.

O GRA. 3.3 apresenta a área ou campo de audição dos seres humanos. Esses valores foram obtidos como resultados de um experimento realizado com um grupo de ouvintes treinados, que eram solicitados a julgar quando um tom puro, em dada frequência, com determinado nível sonoro, se tornava audível (limiar de audibilidade – curva inferior) e “desconfortável” (limiar de dor – curva superior). Observa-se que no limiar da audibilidade a estimulação da audição requer níveis sonoros cada vez mais elevados, à medida que a frequência de tons puros cai abaixo de 200 Hz, e que o sistema auditivo não é sensibilizado por sons inferiores a 20 Hz e acima de 20 kHz. No limiar de dor, o desconforto auditivo começa a ser sentido a partir de 120 dB nas baixas e altas frequências, e entre 100-120 dB para frequências onde a sensibilidade auditiva é maior. Na região entre esses limiares encontram-se as regiões predominantes para a música e a fala.

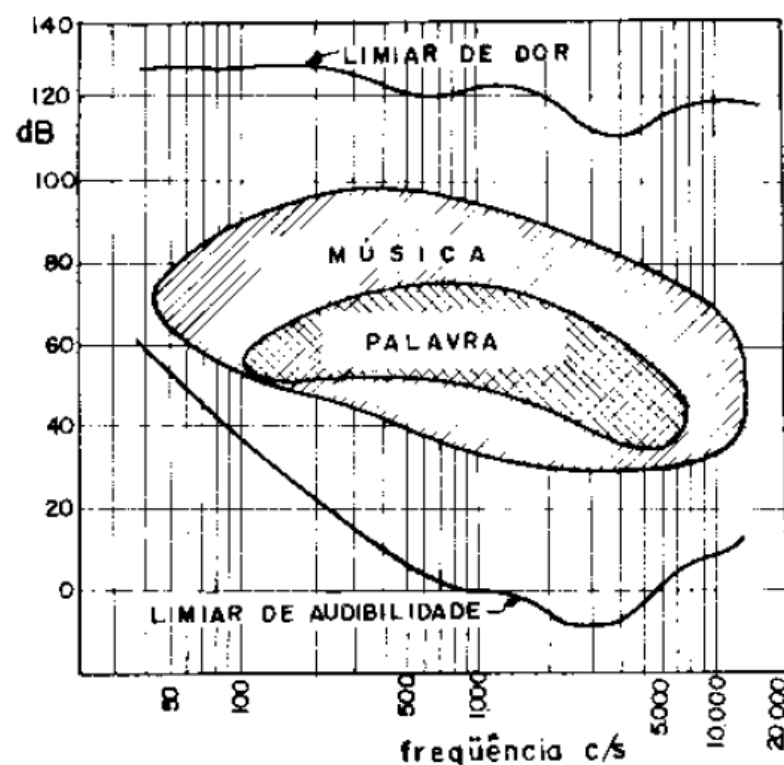


GRÁFICO 3.3 – Área de audição dos seres humanos

FONTE: GERGES, 1992.

3.3.3.1 Banda crítica

De acordo com o mecanismo de audição, tons puros de diferentes frequências colocam em movimento vibratório diferentes pontos da membrana basilar – tons puros de alta frequência vibram pontos próximos a base, e tons puros de baixas frequências vibram pontos próximos

ao ápice da membrana basilar. Embora cada frequência seja mapeada num ponto específico da membrana basilar, ocorre que esse ponto não consegue vibrar sem que uma faixa da membrana ao seu redor vibre junto. Essa faixa é denominada banda crítica (BISTAFA, 2006).

Em outras palavras a banda crítica é uma faixa de frequências acima e abaixo de certa frequência de um som puro que interferirá na percepção de outro som, se a frequência deste estiver dentro daquela faixa.

A largura da banda crítica é determinada pelas propriedades da membrana basilar. Algumas aproximações práticas são utilizadas para determinação da banda crítica como apresentado no GRA. 3.4.

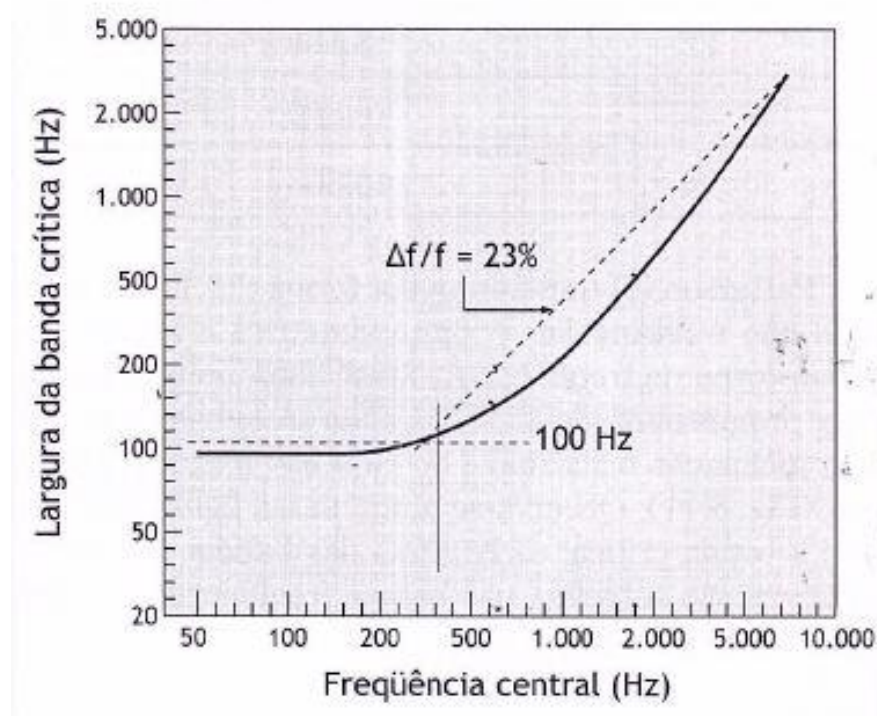


GRÁFICO 3.4 – Largura da banda crítica em função da frequência central

FONTE: BISTAFA, 2006.

3.3.3.2 Sensação subjetiva de intensidade dos sons (“loudness”)

A sensação subjetiva da intensidade depende da frequência do som. A fim de mensurar subjetivamente a intensidade dos sons, foi criada uma grandeza psicoacústica, chamada nível de audibilidade (“loudness”). O nível de audibilidade é função do nível sonoro e da frequência do som.

Quem primeiro mediu experimentalmente o nível de audibilidade para tons puros de diversas frequências foi FLETCHER e MUNSON apud BISTAFÁ (2006). Ouvintes treinados eram solicitados a ajustar o nível sonoro de um tom puro em determinada frequência, tal que eles o julgassem subjetivamente tão intenso quanto o de um tom puro em 1000 Hz com nível sonoro conhecido. O nível sonoro do tom puro em 1000 Hz passou a ser a medida do nível de audibilidade e a unidade fundamental para representá-lo foi chamada de fone.

Vários pontos na área de audição foram investigados, e construíram-se curvas ligando os pontos de um mesmo nível de audibilidade. Tais curvas são denominadas isoaudíveis ou isofônicas. Devido à sua importância essas curvas foram normalizadas pela “International Organization for Standardization” (ISO). Essas curvas são apresentadas através do GRA. 3.5:

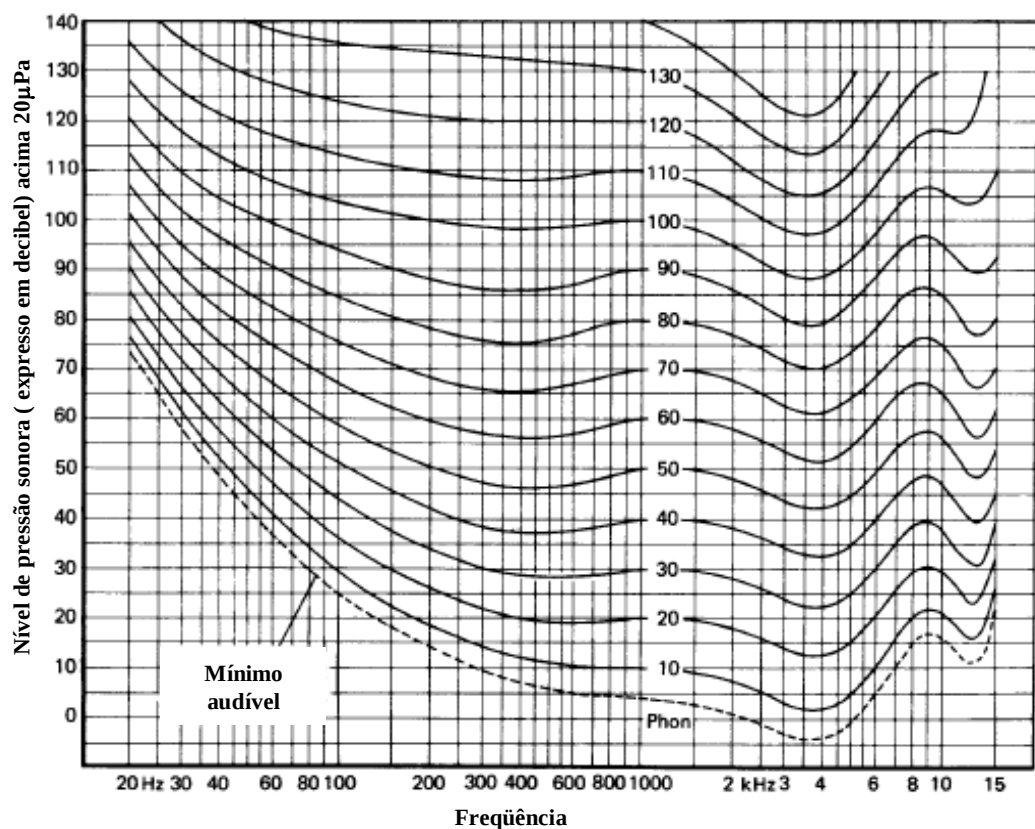


GRÁFICO 3.5 – Curvas de mesmo nível de audibilidade para tons puros

FONTE: BISTAFÁ, 2006.

Percebe-se através de suas distribuições uma menor sensibilidade do sistema auditivo nas baixas frequências do que nas altas. Como exemplo tem-se que um tom puro de 50 dB em 1000 Hz, gera um nível de audibilidade de 50 fones, que é o mesmo nível de audibilidade

gerado por um tom puro com nível sonoro de aproximadamente 60 dB em 100 Hz. Necessita-se, portanto de mais energia nas baixas frequências para provocar o mesmo nível de audibilidade.

Entretanto, deve-se atentar que embora sons com o mesmo nível de audibilidade sejam subjetivamente considerados igualmente intensos, não significa que um com nível de audibilidade de 60 fones seja duas vezes mais intenso que um som com nível de audibilidade de 30 fones. Isso se explica pelo fato de que o aumento subjetivo da intensidade ser controlado pelas bandas críticas. Para sons que competem pelas células ciliadas de uma mesma banda crítica, o limiar diferencial do nível de audibilidade é de apenas 3 fones.

Para se perceber subjetivamente uma duplicação de intensidade, é necessário um aumento do nível de audibilidade em torno de 10 fones. Esse comportamento parece ser explicado pelos limites das taxas de descarga de impulsos elétricos de células ciliadas de uma mesma banda crítica, indicando que a duplicação da energia sonora não duplica a taxa de descarga de impulsos elétricos para o cérebro.

Para mensurar a variação subjetiva de intensidade ao se variar o nível de audibilidade de um tom puro, foi criada uma grandeza que recebeu o nome de audibilidade (“loudness”). A unidade de medida para audibilidade chama-se sone, definindo-se 1 sone como a audibilidade de um tom puro com nível de audibilidade de 40 fones. A relação entre “loudness” (N) em sonos, e o nível de “loudness” (N_L), em fones, é dada pela EQ. (3.1) válida para tons puros de quaisquer frequências.

$$N = 2^{(N_L - 40)/10} \quad (3.1)$$

Podemos afirmar então que o sone expressa a sensação subjetiva de intensidade do som em uma escala linear, ou seja, um tom puro com audibilidade de 16 sonos é julgado subjetivamente como duas vezes mais intenso que um tom puro de mesma frequência, com audibilidade de 8 sonos, e quatro vezes mais intenso que um tom puro de mesma frequência com audibilidade de 4 sonos.

3.3.3.3 Sensação subjetiva de frequência dos sons

Os seres humanos percebem subjetivamente a frequência dos sons em uma escala diferente da escala linear em hertz. Isso significa que, quando uma pessoa ouve um tom puro com o dobro de frequência de um tom puro de referência, ela não necessariamente perceberá subjetivamente esse tom puro como tendo uma frequência duas vezes maior.

Essa característica do sistema auditivo dos seres humanos levou ao desenvolvimento de grandezas que representassem esse comportamento. A sensação subjetiva de frequência chama-se tonalidade (“pitch”) e para mensurá-la são utilizadas duas grandezas: razão de banda crítica (z) e mel (M). Ambas as grandezas mostram que a sensibilidade a variações de tonalidade se reduz com o aumento da frequência (GRA. 3.6).

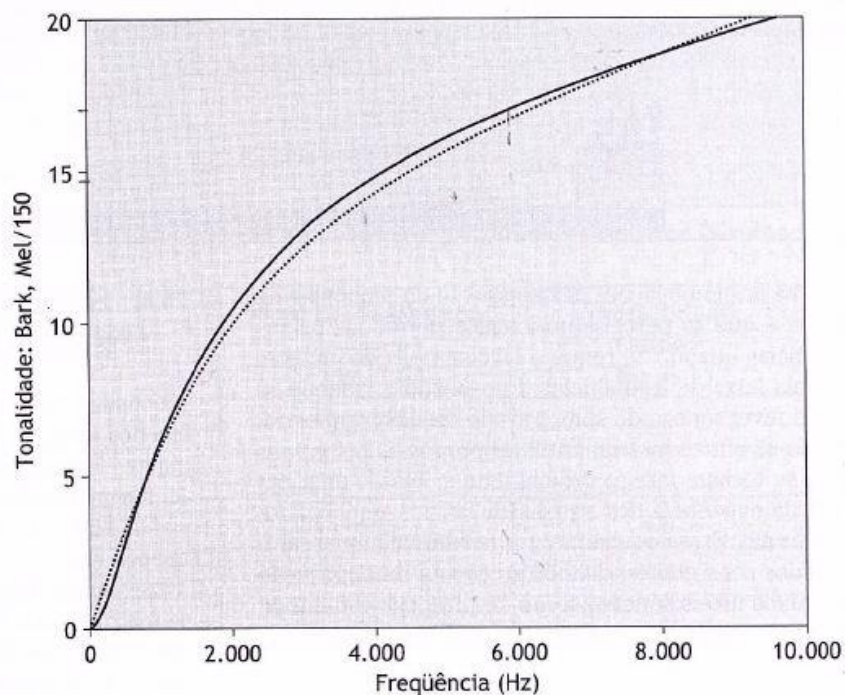


GRÁFICO 3.6 – Relação entre frequência (Hz) e tonalidade (bark e mel)

FONTE: BISTAFA, 2006.

A razão de banda crítica tem como unidade o bark, e foi desenvolvida a partir de 24 bandas dos filtros auditivos propostos por ZWICKER e FASTL (1999) as quais geraram uma escala de tonalidade que vai de 0 a 24 bark. Uma relação aproximada entre a razão de banda crítica z , em bark, e a frequência f , em hertz é dada pela EQ. (3.2):

$$z = 6 \ln \left[\frac{f}{1200\pi} + \left(\left(\frac{f}{1200\pi} \right)^2 + 1 \right)^{0.5} \right] \quad (3.2)$$

Partindo de outra metodologia, a grandeza mel foi desenvolvida por medidas diretas da tonalidade de tons puros por STEVENS e VOLKMANN apud Bistafa (2006). Ouvintes ajustavam a frequência de um tom puro até que eles a julgassem aumentada ou reduzida em relação a um tom puro de referência de 1000 Hz. O mel (M) expressa a sensação subjetiva de frequência do som em uma escala linear. Uma relação aproximada entre mel e frequência, em hertz é dada pela EQ. (3.3):

$$M = 2.595 \log \left(1 + \frac{f}{700} \right) \quad (3.3)$$

Analogamente à audibilidade, a tonalidade é uma grandeza complexa, sujeita a diversas grandezas físicas, que caracterizam o som, e também ao observador. Embora seja um parâmetro que dependa principalmente da frequência, sofre também influência da amplitude e da forma de onda.

3.3.3.4 Alguns fenômenos que interferem na sensação subjetiva dos sons

Mascaramento: Ocorre quando um som interfere na percepção de outro. A origem do mascaramento pode ser compreendida pelo deslocamento da membrana basilar para tons de diferentes frequências.

Tons de baixa frequência geram atividade numa extensão maior da membrana basilar do que tons de alta frequência. Assim, tons de baixa frequência podem interferir na capacidade de perceber tons de alta frequência. Devido à assimetria do deslocamento da membrana basilar, tons de alta frequência têm menor capacidade de interferir na percepção de tons de baixa frequência (GRA. 3.7).

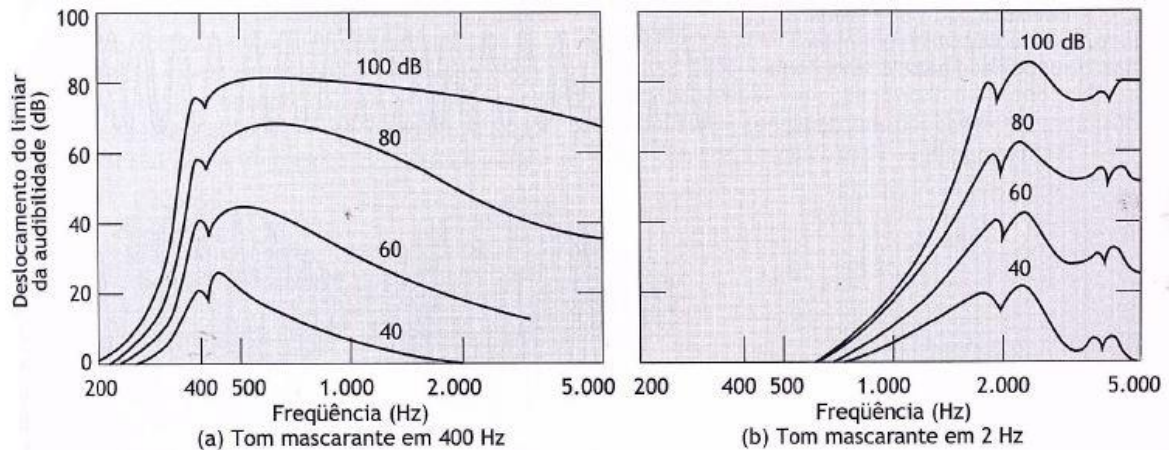


GRÁFICO 3.7 – Deslocamento do limiar da audibilidade por tom puro

FONTE: BISTAFA, 2006.

Conforme apresentado no GRA. 3.8, o tom mascarante (indesejável) eleva o limiar da audibilidade dos tons mascarados (desejáveis). Os dois tons puros nas frequências adjacentes à do tom mascarado não são percebidos, pois suas amplitudes estão abaixo da curva de deslocamento do limiar de audibilidade. Observa-se, porém que o tom mascarante não consegue mascarar o tom de frequência mais baixa.

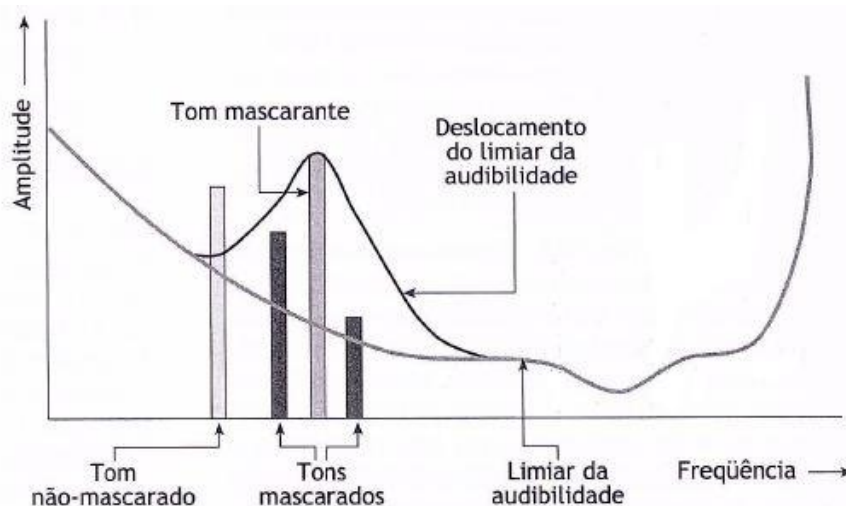


GRÁFICO 3.8 – Deslocamento do limiar de audibilidade por tom puro

FONTE: BISTAFA, 2006.

Consonância e Dissonância: São sensações subjetivas de grande importância inclusive na acústica musical. Consonância ocorre quando a combinação de tons puros é subjetivamente agradável. Dissonância, ao contrário, ocorre quando a combinação de tons puros parece “mal resolvida” e desagradável.

Dado um tom puro em determinada frequência, a combinação de um segundo tom puro numa frequência próxima, provocará batimentos⁴. Ao se aumentar a diferença entre as frequências desses dois tons puros, a sensação percebida será a de um som áspero. Haverá um intervalo de frequências maior, no qual os dois tons puros soam suaves e distintos (FIG. 3.8). A faixa de frequências na qual se ouve os batimentos e as asperezas é a largura de banda crítica.

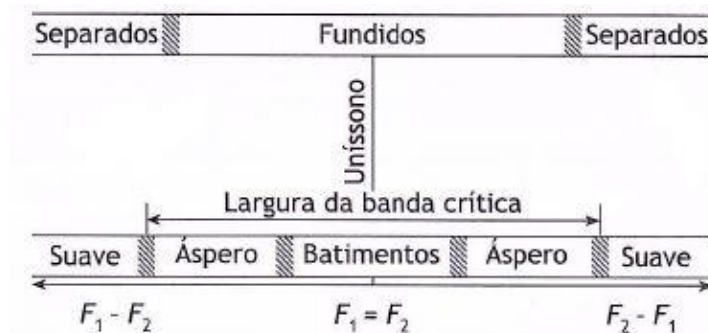


FIGURA 3.8 – Largura de banda crítica x sensação de dissonância e consonância

FONTE: BISTAFA, 2006.

Tons combinados: Quando dois tons (chegando simultaneamente em uma ou ambas as orelhas) estão bem espaçados em frequência e com audibilidade suficiente, tons combinados são percebidos. Esses tons não estão presentes nos tons originais, sendo gerados pelo sistema auditivo. Existe um conjunto de combinações possíveis cujas frequências são obtidas através de somas e diferenças das frequências originais f_1 e f_2 , expressas através da EQ. (3.4):

$$f_{nm} = |mf_2 \pm nf_1| \quad (3.4)$$

Na qual:

$n, m = 1, 2, 3, \dots$

Contudo, somente algumas das frequências geradas (f_{nm}) serão percebidas. Uma das frequências mais fáceis de perceber é o módulo da diferença $|f_2 - f_1|$. A geração de tons que não estão presentes no som original é uma característica de sistemas não-lineares do ouvido humano (BISTAFA, 2006).

⁴ Literalmente o que se escuta, um único tom com pulsação rítmica gerado pela superposição de dois tons na mesma região da membrana basilar.

3.4 Métricas de psicoacústica

Psicoacústica é o estudo de como os seres humanos percebem o fenômeno sonoro, ou segundo BODDEN (1997) pode ser definida como a ciência que trata da relação entre os parâmetros de ondas acústicas e os atributos de eventos auditivos. Estuda a transformação da pressão sonora no ouvido externo em impulso nervoso pelo ouvido interno, e parte do processamento do cérebro. Aqui o interesse é a resposta subjetiva ao som em termos de sua altura, volume, duração, timbre e posição aparente. As categorias do estudo da psicoacústica não são estanques, pois existe considerável interdependência entre elas. Por exemplo, a nossa sensação de altura é dependente do tempo, e nossa percepção de volume varia consideravelmente com a frequência e o timbre.

É importante que se note que a maioria dos resultados obtidos no estudo da psicoacústica tem sido colhida experimentalmente. Tais resultados são inferidos de testes em situações cuidadosamente preparadas, com um grupo de ouvintes, cujas respostas a estímulos sonoros são monitoradas e analisadas. Estes experimentos são geralmente baseados em comparação de dois sons diferentes, por meio de uma escala subjetiva de valores. Os ouvintes são questionados sobre o que ouviram, por exemplo, em termos de "mais alto" ou "mais brilhante", etc.. GENUIT (2008) ressalta que parâmetros subjetivos obtidos experimentalmente devem ser determinados estatisticamente devido a variabilidade das respostas humanas para uma situação particular.

Muitas das descobertas da psicoacústica residem no plano experimental, pois razões físicas ou anatômicas sobre a sua causa ainda não são conhecidas. No entanto os dados apresentados pela psicoacústica são muito importantes para o entendimento da relação entre a percepção humana e o ambiente sonoro que a envolve.

As métricas foram criadas com o objetivo específico de quantificar a percepção humana de um determinado tipo de ruído. Geralmente, o desenvolvimento de uma métrica envolve a realização de um grande número de avaliações subjetivas do ruído estudado, de forma a obter um comportamento médio para a percepção humana daquele ruído.

A representatividade das métricas é limitada. Poucas vezes existem definições únicas, estabelecidas ou normalizadas para as métricas. A correlação dos resultados objetivos com avaliação subjetiva é alta apenas para sons simples (PAUL et al., 2005)

Tradicionalmente a grandeza usada em acústica quantifica parâmetros como nível de pressão sonora, nível de potência sonora e nível de intensidade sonora. Estas grandezas caracterizam o ruído, porém falham em refletir a percepção humana. A percepção humana é quantificada através de parâmetros psicoacústicos tais como “Loudness” (N), “Sharpness” (S), “Roughness” (R), “Fluctuation Strength” (FS), “Pleasantness” (P), “Annoyance” (A), “Tonality” (T), curtose (K), entre outros (GERGES et al., 2004). A seguir, uma breve definição de alguns parâmetros psicoacústicos utilizados para avaliação de qualidade sonora no presente trabalho:

3.4.1 “Loudness” (N)

A potência sonora chegando no aparelho auditivo cria a percepção relacionada com o volume do som, isto é, com a amplitude das ondas sonoras. Uma das formas de quantificar a percepção da intensidade é o “loudness”, o qual pode ser expresso em sones (BERANEK, 1951) e (STEVENS, 1955). A referência para a escala de medida é a sensação de volume causada por um tom a 1kHz a 40 dB, que corresponde a 1 sone (ZWICKER e FASTL, 1999).

O principal efeito caracterizando o “loudness” é a distribuição do espectro acústico através das bandas críticas. Estas bandas de frequência estão relacionadas com a forma com que o nosso sistema auditivo analisa as ondas complexas que o atingem. Em termos de sensação de amplitude, nosso ouvido mescla todos os sons dentro de uma mesma banda crítica, obtendo uma sensação de volume global na banda, ou seja, naquela faixa de frequências. Bandas adjacentes interferem entre si, mascarando a sensação de níveis esperados (ZWICKER e FASTL, 1999). Esse mascaramento pode conduzir a uma percepção de volume que não corresponde ao simples somatório de energia sobre o campo de frequências audível, tal como realizado tradicionalmente sem considerar toda a complexidade da percepção auditiva. A subjetividade da sensação do volume não é avaliada perfeitamente por tais medidas, como de dB(A) por exemplo.

O “loudness” específico refere-se à sensação do “loudness” causada pela excitação acústica em cada banda crítica. Isso se assemelha à uma análise em bandas de frequências (ZWICKER e FASTL, 1999), (STEVENS, 1956) e (STEVENS, 1961). O “loudness” específico N' de uma banda crítica (z), em sones pode ser descrito como na EQ. (3.5):

$$N' = 0,08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_0} \right)^{0,23} \left[\left(0,5 + 0,5 \frac{E}{E_{TQ}} \right)^{0,23} - 1 \right] \quad (3.5)$$

Na qual:

E_{TQ} : é a excitação acústica no limiar do silêncio

E_0 : é a excitação correspondente à intensidade sonora de referência ($I_0=10^{-12}$ W/m²)

E : é a excitação sonora que cai dentro da banda crítica sendo analisada.

A escala de frequências pode ser relacionada com a escala de bandas críticas, medidas em Bark de acordo com a EQ. (3.6):

$$z = 13 \arctan(0,76 f) + 3,5 \arctan(f / 7,5)^2 \quad (3.6)$$

Na qual:

z : é a banda crítica em Barks

f : é a frequência em kHz

O “loudness” específico pode ser mostrado por gráfico em bandas críticas (Barks), de maneira similar as análises em bandas de 1/3 de oitava. O efeito do mascaramento pode ser avaliado no gráfico segundo o descrito na norma ISO 532 (1975) sobre o cálculo de “loudness” global. Esta norma, ISO 532, padroniza através de um processo gráfico, partindo de uma análise em frequência em bandas críticas, a determinação dos níveis de “loudness”. A quantificação do efeito de mascaramento é obtida através de curvas de decaimento na direção das frequências mais altas. O somatório dos “loudness” específicos fornece o “loudness” global.

3.4.2 “Sharpness” (S)

O parâmetro “sharpness” reflete a sensação relacionada ao espectro sonoro e suas componentes nas frequências mais altas, sua unidade de medidas é o acum. Este efeito é mais relevante para a energia situada acima de 8 Bark (ZWICKER e FASTL, 1999). O “sharpness” pode ser compreendido como uma ponderação do “loudness”. O sinal de referência para o “sharpness” é um ruído com frequência centrada em 1 kHz e com um nível igual a 60 dB e largura de banda igual a uma banda crítica. O “sharpness” global S em acum pode ser calculado (AURES, 1985) a partir do “loudness” específico N’ como expresso na EQ. (3.7):

$$S = c \frac{\int_{z=0}^{24} N'(z)g'(z)dz}{\ln\left(\frac{N+20}{20}\right)} \quad (3.7)$$

A função de ponderação $g'(z)$ é da forma apresentada na EQ. (3.8):

$$g'(z) = 0,0165 \exp(0,171z) \quad (3.8)$$

Na qual:

z: é a banda crítica em Barks e N e N’ são o “loudness” e “loudness” específico respectivamente em sonos.

c: constante que relaciona o sinal de referência (fator de escala)

Como no caso do “loudness” específico, o “sharpness” específico é a contribuição de uma única banda crítica para a sensação global do “sharpness”. Desta forma, o “sharpness” específico pode ser calculado da EQ. (3.7) se os limites de integração são restritos a uma banda crítica. Isto também se assemelha a uma análise por bandas de frequências para a sensação de “sharpness”. O “sharpness” global é o resultado do somatório dos valores do “sharpness” específico.

Além do método de AURES (1985) outros métodos foram desenvolvidos para cálculo do “sharpness”:

- Método Von Bismark: Nesse método o procedimento de cálculo é baseado na distribuição do “loudness” específico através da faixa de banda crítica de acordo com as EQ. (3.9) e (3.10). Esse processo refere-se a sons de intensidade igual, o que significa que a influência do volume absoluto sobre a “sharpness” não é levado em consideração. O método Aures considera a correção da fórmula de Von Bismark baseado e outros tipos de resultados, de forma que o “loudness” é levado em consideração (HEAD ACOUSTICS, 2009).

$$S = c \frac{\int_0^{24Bark} N' \cdot z \cdot g(dz) dz}{N} \quad (3.9)$$

$$g(z) = \begin{cases} 1 & z < 14Bark \\ 1 + 0.003 \cdot (z - 14Bark)^3 & z \geq 14Bark \end{cases} \quad (3.10)$$

- Método DIN 45692: É considerado similar ao método de Von Bismark. Esse procedimento compila um projeto de normas que padroniza o cálculo do “sharpness” (HEAD ACOUSTICS, 2009). Ao utilizar o método DIN considera-se, por exemplo, que o método normalizado para cálculo do “loudness” também será utilizado (EQ. (3.11) e (3.12)).

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24Bark} N' \cdot z \cdot g(z) dz}{N} \quad (3.11)$$

$$g(z) = \begin{cases} 1 & z \leq 15.8Bark \\ 0.85 + 0.15 \cdot e^{0.42(z-15.8)} & z > 15.8Bark \end{cases} \quad (3.12)$$

Os métodos apresentados oferecem resultados com variações consideráveis. Por esta razão, toda vez que um valor de “sharpness” é apresentado deve ser mencionado o método de cálculo adotado.

Na FIG. 3.9 são apresentadas as diferenças entre os métodos de cálculo, no qual o gráfico a esquerda refere-se a um ruído rosa (amplitude decrescente com a frequência num determinado intervalo do espectro) e o gráfico à direita ao ruído de um motor elétrico.

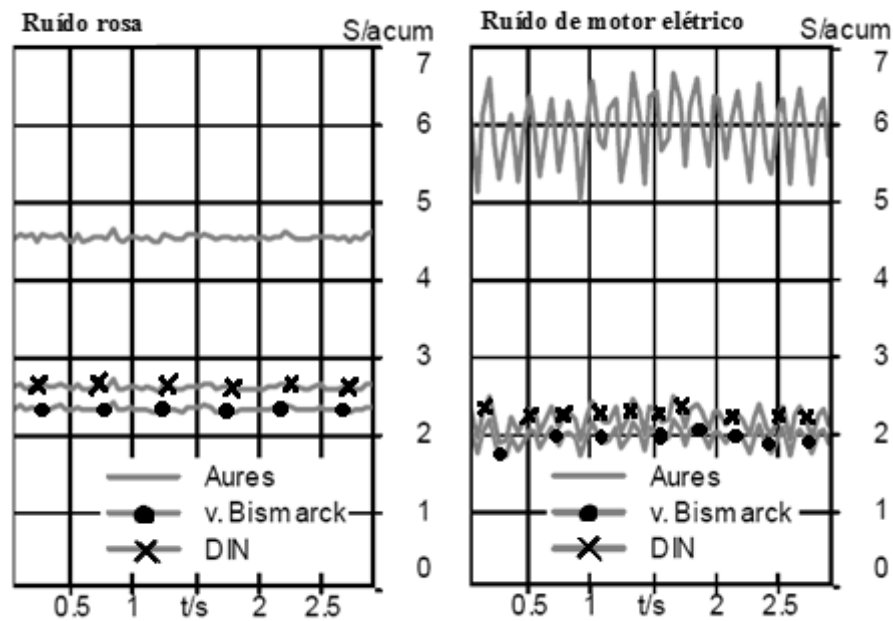


FIGURA 3.9 – Comparação dos métodos de cálculo para sharpness

FONTE: HEAD ACOUSTICS, 2009.

A escolha de um único método não pode ser visto como um princípio absoluto. A escolha do método apropriado deverá ser feita de acordo com o ruído analisado e a faixa de problemas do experimento. A escala de “sharpness” pelo método Aures é maior em comparação com os outros métodos, e a diferença do ruído individual de cada fonte é colocada em destaque. Por outro lado a consideração do “loudness” no método Aures não corresponde à percepção subjetiva em testes de indivíduos para certos tipos de casos.

3.4.3 “Fluctuation Strength” (F) e “Roughness” (R)

A modulação da pressão sonora conduz a dois tipos de sensações, “roughness” medida em asper e “fluctuation strength” medida em vacil. Estes dois parâmetros diferem na frequência de modulação. Para frequências de modulação inferiores a 20 Hz, a sensação ligada ao parâmetro “fluctuation strength” é percebida, alcançando seu máximo em aproximadamente 4 Hz. Já a aspereza “roughness” começa a ser sentida a partir de modulações superiores a 15 Hz alcançando seu máximo em aproximadamente 70 Hz. Modulações com frequência entre 15 e 20 Hz ocorrem, portanto, em uma região de transição entre as duas sensações apresentadas (PINTO, 2003).

O sinal de referência para o “fluctuation strength” é um tom puro de 60 dB, a 1 kHz com amplitude 100% modulada a 4 Hz, que corresponde a 1 vacil. Para o caso da sensação do “roughness”, 1 asper é definido pelo mesmo sinal mas com uma frequência de modulação de 70 Hz. Ambas as sensações, sendo próximas em suas causas, levam a modelos de cálculos similares. A EQ. (3.13) descreve um modelo para o cálculo de “fluctuation strength” F em vacil, enquanto a EQ. (3.14), o modelo para cálculo de “roughness” R em asper:

$$F = \frac{0,008 \int_0^{24} \Delta L(z) dz}{\left(\frac{f_{\text{mod}}}{4} \right) + \left(\frac{4}{f_{\text{mod}}} \right)} \quad (3.13)$$

$$R = \frac{0,3 f_{\text{mod}}}{1000} \int_0^{24} \Delta L(z) dz \quad (3.14)$$

Nas quais:

f_{mod} : é a frequência de modulação em Hz

$\Delta L(z)$: é a profundidade de mascaramento

Esta última considera o feito de mascaramento temporal presente em nosso sistema de audição. Dada a dificuldade de se obter os dados necessários sobre $\Delta L(z)$, o uso de variações temporais do “loudness” específico é aconselhável e bem correlacionado com resultados experimentais (ZWICKER e FASTL, 1999).

3.5 Outros parâmetros

Além das métricas de psicoacústica, outros dois parâmetros foram calculados e utilizados no desenvolvimento desse trabalho:

3.5.1 Índice de articulação (I.A)

Usado para a quantificação da intensidade de sons interferentes com a fala (usado especialmente no campo das telecomunicações). O índice de articulação é calculado pela medição do ruído interno ao veículo (ABNT NBR 12969, 1993).

Trata-se de um parâmetro físico (objetivo) calculado a partir de medidas acústicas efetuadas em um sistema de comunicação, indicativo do grau de inteligibilidade que se obteria para um sistema sob condições de ensaios reais de inteligibilidade. A inteligibilidade é um parâmetro psicológico (subjetivo) medido em percentagens de sílabas, palavras ou sentenças entendidas corretamente por um ouvinte em um universo de sílabas, palavras ou sentenças foneticamente balanceadas e emitidas por um orador, em um sistema de comunicação sob condições reais.

O I.A., expresso em percentagem, pode ser calculado conforme a EQ. (3.15), com auxílio do GRA. 3.9 e da TAB. 3.1:

$$IA = \sum_f \left[(N_s(f) - L(f)) \frac{P(f)}{30} \right] \quad (3.15)$$

Na qual:

f : frequência, em terças de oitava, de 200 a 6300 Hz

$N_s(f)$: valor da pressão sonora, em dB, correspondente a cada faixa de terço de oitava, do limite superior da região da fala idealizada.

$L(f)$: valor da pressão sonora, em dB, do ruído interno do veículo, para cada terço de oitava.

$P(f)$: peso correspondente a máxima contribuição ao IA, para cada terço de oitava.

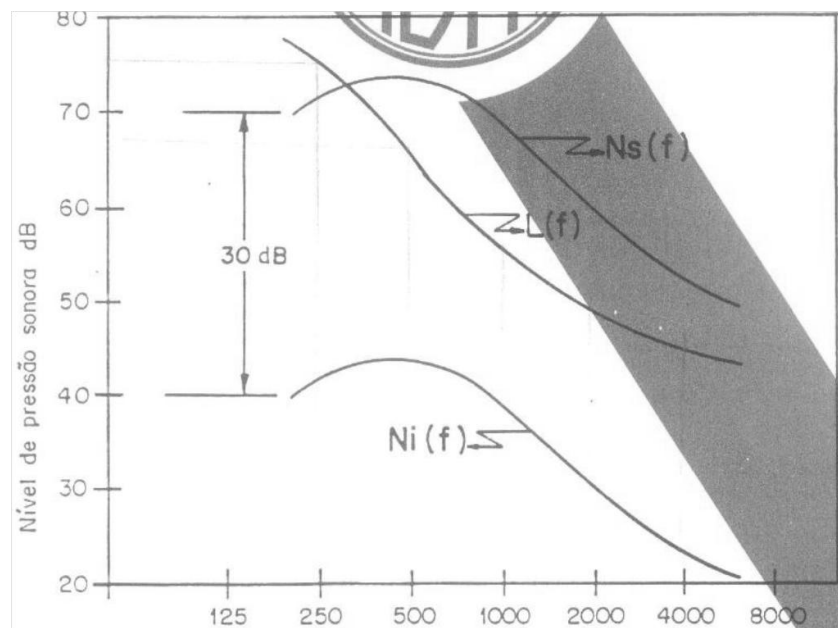


GRÁFICO 3.9 – Limites da região da fala

FONTE: ABNT NBR 12969, 1993.

TABELA 3.1 – Valores de Ns (f) e P (f) usados no cálculo do IA

Bandas 1/3 oit	Ns(f)	P(f)
200	64	1
250	69	2
315	71	3,25
400	73	4,25
500	75	4,5
630	75	5,25
800	75	6,5
1000	74	7,25
1250	72	8,5
1600	70	11,5
2000	67	11
2500	65	9,5
3150	63	9
4000	60	7,75
5000	56	6,25
6300	51	2,5

FONTE: ABNT NBR 12969, 1993.

O índice de articulação e a inteligibilidade são relacionados através do GRA. 3.10, na qual cada curva expressa um parâmetro de ensaio distinto conforme descrito abaixo:

Curva 1: vocabulário de ensaio limitado a 32 palavras foneticamente balanceadas;

Curva 2: sentenças (conhecidas dos ouvintes);

Curva 3: sentenças (não conhecidas dos ouvintes);

Curva 4: vocabulário de ensaio limitado a 256 palavras foneticamente balanceadas;

Curva 5: ensaio com rima;

Curva 6: palavras foneticamente balanceadas (100 palavras distintas);

Curva 7: sílabas sem sentido (1000 palavras diferentes).

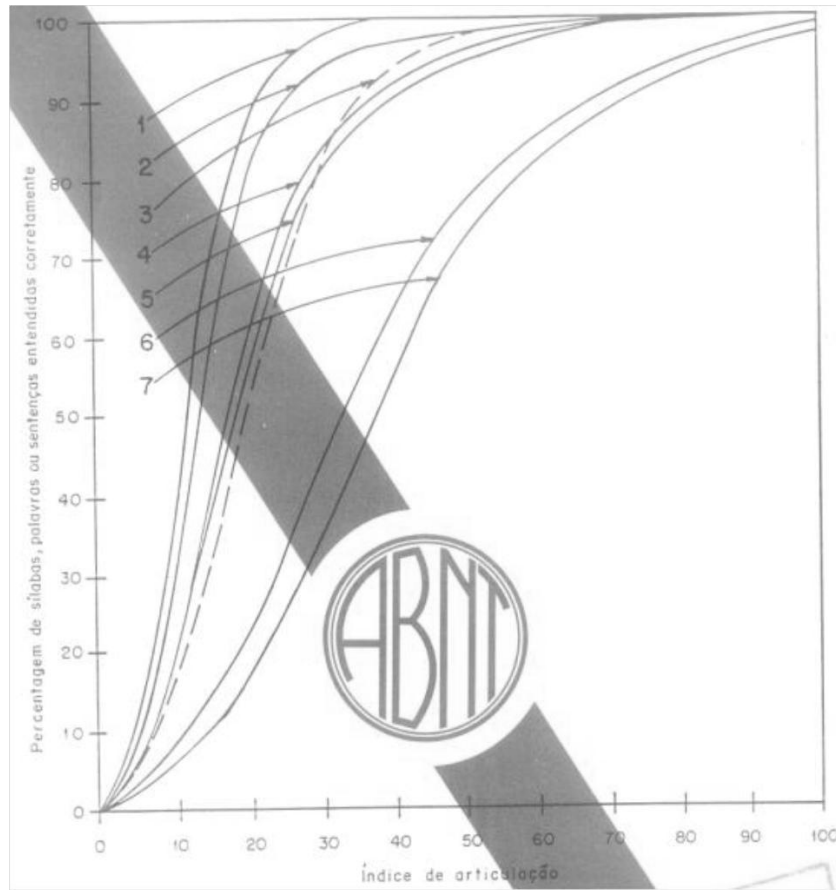


GRÁFICO 3.10 – Índice de articulação x inteligibilidade

FONTE: ABNT NBR 12969, 1993.

Como regra geral tem que um índice de articulação (IA) > que 60% representa uma boa inteligibilidade, enquanto um IA < 30% indica uma inteligibilidade ruim.

3.5.2 Curtose (K)

Curtose ou curtose é um parâmetro estatístico que mede a impulsividade da distribuição de sinal no tempo. Basicamente este parâmetro soma no tempo amostral todas as diferenças de nível do valor médio do sinal elevado à quarta potência em relação a um padrão. O método exagera os impulsos do som e um valor alto de curtose normalmente reflete um som de baixa qualidade (NOR et al., 2008). O parâmetro curtose pode ser calculado através da EQ. (3.16):

$$K = \frac{M_4}{\sigma^4} \quad (3.16)$$

Na qual:

σ : é o desvio padrão

M_r : é o momento de ordem r^o da média $\bar{x}$.

Na forma discreta esses valores são cálculos pelas EQ. (3.17) e (3.18):

$$M_r = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^r \quad (3.17)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (3.18)$$

Na qual n é o tamanho da amostra.

4. APLICAÇÃO À INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Esse capítulo apresenta algumas referências bibliográficas de pesquisas desenvolvidas nos últimos 17 anos no setor automobilístico. A maioria dos trabalhos busca, de alguma forma, entender o papel do som e da vibração na percepção dos consumidores e estabelecer metas ou metodologias realísticas para assegurar o desejo comercial. Ao final dessa seção são identificados os principais trabalhos que contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

4.1 Principais trabalhos

Em 1995 MATTHIAS et al., iniciaram um estudo para correlação entre análise subjetiva e objetiva de ruído. Em seus levantamentos, verificou-se que sons com altas amplitudes eram percebidos como “altos”, aqueles com grande quantidade de altas frequências eram tidos como “sharp” ou agudos, baixas frequências reforçadas resultavam em sensações de “abafamento” e modulações especiais no domínio do tempo eram percebidas como “ásperas”. Observou também que variações extremas no nível sonoro em relação à rotação do motor em uma pequena faixa de velocidades (mais que 15 dB/500 RPM) levavam a um som desconfortável, enquanto variações sutis no nível sonoro criavam um som potente. Um alto conforto sonoro era obtido reduzindo barulhos incômodos o máximo possível. Um exemplo de barulho incômodo descrito foi os sons impulsivos, causados pelos impactos, por exemplo, dos trens de engrenagens. Tais impactos eram percebidos como “perturbantes”.

WEISCH et al. (1997) realizou um experimento para criação de um índice de qualidade sonora para o interior de um veículo para avaliação de ruído tipo “grilos”. A análise subjetiva foi realizada com aproximadamente 70 pessoas que inicialmente avaliaram 25 gravações digitais de veículos e configurações diferentes. Cada indivíduo fez a comparação de gravações em pares e decidiu entre a melhor ou pior.

Através de um processo de comparação, os dados fornecidos pela sensação dos indivíduos foram correlacionados com parâmetros psicoacústicos medidos a partir das mesmas gravações às quais o júri foi submetido. Por meio de uma técnica de regressão múltipla, a combinação de parâmetros mais representativa foi estabelecida.

Foram selecionados 61 parâmetros psicoacústicos, desde os conhecidos níveis de pressão sonora até parâmetros novos para conhecer melhor o grau de modulação, periodicidade, etc.

Para encontrar a correlação entre os dados objetivos e os subjetivos, uma regressão múltipla gradual foi aplicada focando na descrição ótima da classificação subjetiva individual dos conjuntos mais representativos, buscando minimizar o erro quadrático. Esse método gerou a melhor combinação de parâmetros e os fatores correspondentes para se construir um índice final de conforto ou desconforto sonoro conforme EQ. (4.1):

$$Y_s = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + e = Y_0 + e \quad (4.1)$$

Na qual:

Y_s = vetor da classificação subjetiva

x_i = vetores dos parâmetros objetivos

b_i = coeficientes de regressão

e = vetor de resíduos

Y_0 = vetor de dados objetivos (algoritmo),

Os parâmetros significativos encontrados para a determinação do índice de qualidade para avaliação de ruído de “grilos” foram:

- “Loudness”: em sone de acordo com a norma ISO 532;
- Soma dos níveis de modulação: modulação calculada para cada banda de oitava com pesos de acordo com a sensibilidade humana;
- “Preferred Periodicity”: periodicidade em Hz determinada por análise de espectro;
- “Sharpness”: em acum de acordo com ZWICKER e FASTL (1999), calculado a partir do diagrama de “loudness”.

Uma relação com R^2 igual a 0,88 foi encontrada entre o índice estudado e as classificações subjetivas para veículos do mesmo modelo. Para veículos de categorias diferentes o índice encontrado foi de R^2 igual a 0,77. A partir desse estudo, os autores desenvolveram uma ferramenta que permitia aperfeiçoar a qualidade sonora para percursos de pavimentos não ideais.

BODDEN et al. (1998) apresentou um método que foi denominado por “teste individual” no qual o sujeito é livre para escolher a ordem e por quanto tempo ele ouvirá o estímulo sonoro, especificando suas escolhas ao final da avaliação. O autor observou que nesse método o sujeito não tem a impressão de ser controlado pelo teste e, dessa forma, sua autoconfiança se eleva e seu nível de estresse é reduzido.

A avaliação realizada foi sobre a percepção do ruído de câmbio. O objetivo era comparar os três métodos de avaliação subjetiva na qual 5 carros são avaliados. Os testes denominados como absoluto, comparação pareada e teste individual, têm seus resultados apresentados no GRA. 4.1. Os testes mostraram-se com boa correlação entre si, diferindo apenas em um caso em que dois veículos tinham ruído de câmbio semelhante, mas com presença motor distintas. A divergência apareceu no teste absoluto com relação aos demais.

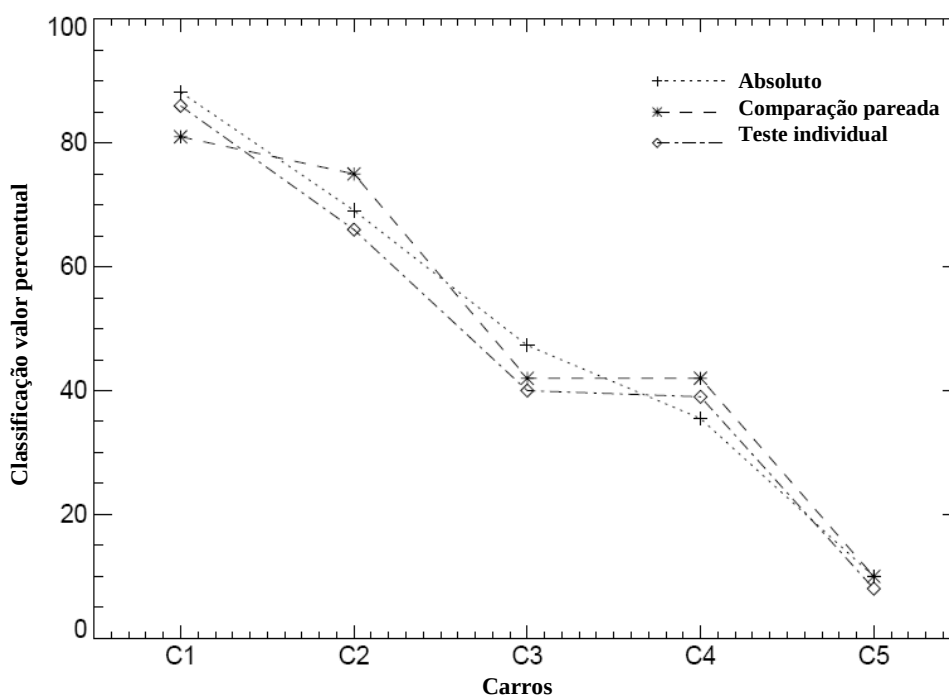


GRÁFICO 4.1 – Resultados dos diferentes métodos em laboratório

FONTE: BODDEN et al., 1998

No GRA. 4.2 o autor compara os resultados obtidos subjetivamente por avaliação em campo com os realizados em laboratório. Os resultados correspondem entre si, mas o teste individual apresentou valores mais próximos ao do teste de campo.

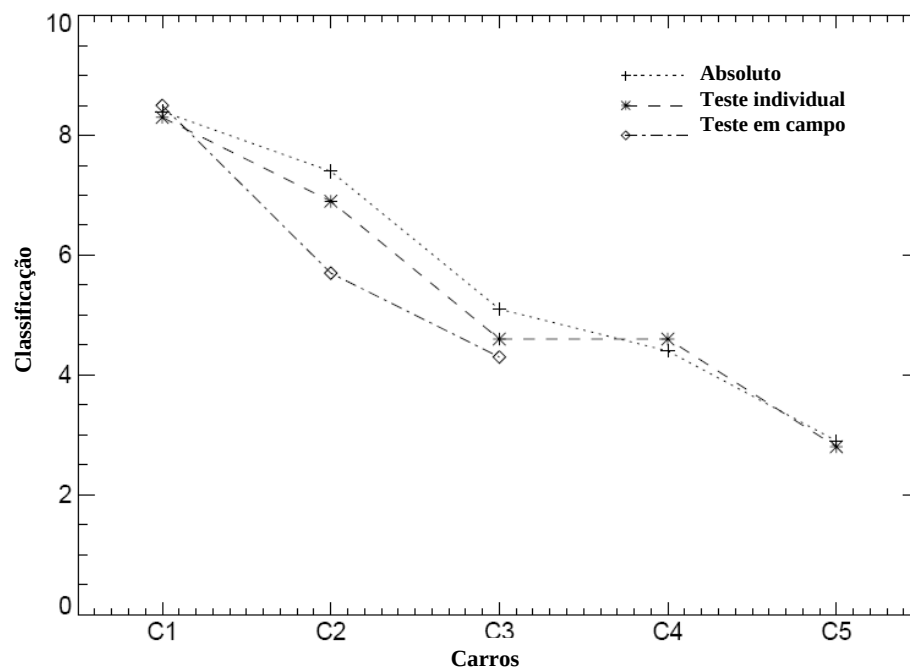


GRÁFICO 4.2 – Resultados em laboratório x campo de teste

FONTE: BODDEN et al., 1998

O autor concluiu que o teste individual é o que melhor atende aos requisitos de aplicações no ambiente industrial, uma vez que ele combina as vantagens dos métodos relativos e absolutos e evita suas desvantagens. O teste retorna não apenas uma classificação exata como também um julgamento absoluto.

HOELDRICH e PFLUEGER (1998) desenvolveram um modelo psicoacústico generalizado para parâmetros de modulação que são ajustados para detectar corretamente a parcela do som relativa ao “roughness” presente no ruído interno de um carro. O modelo foi baseado em duas versões de caminhos de excitação no tempo tendo em conta as diferentes hipóteses psicoacústicas das propriedades do sistema auditivo periférico. Para ganhar flexibilidade no ajuste do procedimento, o modelo apresentava certos graus de liberdade no cálculo do índice de modulação efetiva, “roughness” específico e superposição. O modelo foi testado com sucesso não apenas prevendo a avaliação do “roughness”, como também oferecendo um parâmetro objetivo válido para o mapa de qualidade sonora.

PFLUEGER et al. (1998) propuseram um conjunto de experimentos para detectar a correlação dos parâmetros objetivos com as avaliações subjetivas.

No primeiro experimento, foram avaliados nove ruídos internos que foram escolhidos para representar a métrica “roughness”. O resultado mais significativo foi a alta correlação entre as classificações de “roughness” com parâmetros de intensidade como dB(A), “loudness”, etc. Mais adiante, os testes mostraram claramente que não havia correlação entre a classificação subjetiva do “roughness” e os parâmetros de “roughness” avaliados.

No segundo experimento, as gravações foram amplificadas a fim de manter níveis iguais de “loudness” (todos com 12 sonos). A amplificação não alterou a qualidade natural do som. Nesse teste foram percebidas duas tríades cíclicas entre os resultados, o que apontou certa dificuldade de avaliação quando comparada com o primeiro teste.

No terceiro experimento, o procedimento foi semelhante ao anterior, diferindo apenas no fato de que o “loudness” ao qual as gravações foram amplificadas foi relativa àquela de maior “loudness” (27 sonos). Os resultados apresentaram 15 tríades cíclicas o que indicou que várias pessoas tiveram problemas em executar o experimento. A correlação entre os participantes não foi tão boa quanto no primeiro e segundo experimento.

Ao avaliar a diferença entre os resultados dos três experimentos, uma soma das diferenças das classificações mostrou que, dos sete avaliadores, três foram altamente influenciados pelo “loudness” enquanto apenas 2 tiveram suas classificações pouco influenciadas por essa métrica.

A partir dos três experimentos, PFLUEGER et al. (1998) concluíram que se a diferença de “loudness” é muito grande entre as amostras, a percepção de “roughness” é muito influenciada pelo “loudness”. Ao relacionar os dados objetivos de “roughness” no eixo das ordenadas contra os dados subjetivos no eixo das abscissas, o coeficiente de correlação de R igual a -0,39 contradiz totalmente os dados psicoacústicos. Observa-se que os três experimentos acima foram realizados por meio de pares comparados. Os resultados de apenas um dos participantes foram muito discrepantes com relação aos demais.

No quarto experimento todas as amostras tinham praticamente a mesma altura do som (baixa) e nenhum deles passou por amplificação. O teste foi realizado com 28 participantes os quais avaliaram 13 amostras. Diferentemente dos testes por pares comparados, nem todos eram profissionais da área. Os resultados de seis pessoas foram descartados logo no início por não

apresentarem correlação com os demais participantes. Os resultados dos 22 restantes foram divididos em dois grupos. Como resultados obteve-se que três amostras apresentavam diferenças de mais de 5 pontos (numa escala de 1 a 20) na classificação subjetiva entre os dois grupos. Essas amostras foram responsáveis significativamente para a não homogeneidade dos resultados.

O quinto experimento foi semelhante ao quarto com a única diferença de que nível de “loudness” foi maior. Mais uma vez três amostras de ruídos foram responsáveis pela não homogeneidade das classificações subjetivas.

Em outro estudo dos mesmos autores, eles desenvolveram um novo modelo para o parâmetro de modulação “roughness”. Tal modelo oferece certos graus de liberdade no padrão excitação-tempo, no índice efetivo de modulação, no “roughness” específico e na superposição.

O modelo criado foi testado com sucesso nos dados subjetivos dos experimentos 4 e 5 apresentando um parâmetro de correlação R igual a 0,90. Como principais conclusões desse estudo têm-se que as características sonoras causadas por modulação desempenham um papel importante devido a sua significativa contribuição na percepção de incômodo. Experimentos psicoacústicos para avaliação do “roughness” têm que ser realizados com cautela a fim de obter dados confiáveis para análises com parâmetros objetivos.

Em 2003, GERGES et al. em seu estudo sobre a qualidade sonora de componentes veiculares verificou que o ruído de uma caixa de engrenagem podia ser caracterizado através de correlações com parâmetros de qualidade sonora. A falta de lapidação nos eixos (nos locais que formam a pista interna dos rolamentos) gera ruído em alta frequência, audível em velocidades reduzidas e com carga na transmissão. Essa situação foi satisfatoriamente caracterizada através do “sharpness”. Excentricidades na coroa do diferencial que causavam modulações de baixa frequência foram detectáveis através dos parâmetros de “fluctuation strength” (em baixas velocidades) e “roughness” (para maiores velocidades). Já o ruído produzido pelo engrenamento da marcha à ré (engrenagem de dentes retos) significativamente maior em relação às marchas à frente, foi melhor avaliado através do parâmetro “loudness”. Outros defeitos em engrenagens, como erro de forma, falta de acabamento e falha de material, manifestaram-se primeiramente na frequência de engrenamento e suas harmônicas. Por esse

motivo, o “pitch strength” auxiliou também na detecção de tais anomalias. Já os defeitos em rolamentos provocam modulação das altas frequências na frequência característica da falha. Sendo assim, o “roughness” calculado em uma banda de alta frequência foi utilizado como uma métrica adequada para representar esse fenômeno.

Sistemas de qualidade sonora foram também fundamentais para detecção de ruídos no sistema de direção hidráulica gerados com o veículo em condição de marcha lenta ou em aceleração com as rodas sendo esterçadas. Nesse caso, porém, a avaliação conjunta dos níveis de ruído gerados, através de uma análise FFT, foi indispensável para comparação entre bombas e possíveis avaliação de modificações de projeto.

Para analisar os ruídos do tipo “whine” (gerado com o veículo sendo acelerado com as rodas esterçadas) e tipo “moan” (mesma característica, porém, na frequência de marcha lenta) presentes em bombas de sistemas de direção hidráulica e caixas de engrenagens, GERGES et al. (2003) utilizou um software de qualidade sonora que permitia a implementação de filtros digitais do tipo passa-banda e do tipo corta-banda, com isso foi possível avaliar a influência de cada um destes picos no ruído total dentro do veículo.

Posteriormente, as frequências de ocorrência do fenômeno em questão foram retiradas e analisadas novamente reproduzindo o ruído através dos fones, avaliando-se dessa forma qual pico provocava maior sensação de incômodo.

As medições objetivas, embora tenham apresentado uma precisão significativa nos resultados acerca dos níveis de ruído, não puderam ser simplesmente utilizadas para um julgamento sobre a qualidade do produto, uma vez que não foi considerada a importância dos harmônicos.

Dessa maneira, foi necessário o desenvolvimento de uma métrica que fornecesse um valor único, levando em consideração o nível de pressão sonora (NPS), de modo a facilitar a análise e comparação dos resultados. O desenvolvimento da métrica envolveu a realização de um número considerável de avaliações subjetivas do ruído estudado, de forma a obter um comportamento médio para a percepção humana daquele ruído. Entre as principais métricas utilizadas destacaram-se o “Loudness”, o “Sharpness”, o “Roughness”, etc.

TERAZAWA et al. (2004) propôs uma ferramenta de engenharia na qual é possível atingir os objetivos de qualidade sonora no interior de um veículo através de métodos nos quais não se requer conhecimento profundo em acústica e vibração. Outras técnicas de tratamento do som por meio de software já existiam, mas sua nova ferramenta utiliza apenas uma única métrica psicoacústica, reduzindo o tempo de desenvolvimento de um carro.

O parâmetro psicoacústico é o “powerfulness”. De forma geral, esse índice é expresso pela combinação das ordens relevantes do motor e a razão das ordens não relacionadas a componentes (ruído de fundo), de forma similar ao parâmetro tonalidade proposto por ZWICKER e FASTL (1999), o qual expressa o grau de percepção de um sinal de tom puro no interior do veículo. Esse índice é baseado na mesma ideia da tonalidade, diferenciando apenas no processo de cálculo.

Como resultado desse trabalho, a relação entre as coletas objetivas e subjetivas de “powerfulness” mostrou um coeficiente de correlação de 0,94. A partir dessa relação, é descrito um método para projeto de qualidade sonora no interior de um veículo, baseado nas técnicas de psicoacústica e processamento de sinais. Além disso, algumas técnicas acústicas, de qualidade sonora, simulação e projeto foram integrados em uma ferramenta de software. TERAZAWA et al. (2004) destacaram, porém, que ao contrário de outras ferramentas de engenharia, sua técnica pode ser utilizada para projetar um objetivo de conforto usando um índice de psicoacústica. Esse estudo, porém, não se mostrou perfeitamente preciso, uma vez que foram utilizadas aproximações como a fase da ordem do motor e a contribuição de outras fontes.

No estudo de RENZO et al. (2004) o júri constituiu-se de 29 indivíduos dentre os quais estavam envolvidos pilotos profissionais da área de vibroacústica, denominados usuários específicos e usuários normais. Dentre outros objetivos da pesquisa pretendia-se avaliar uma possível diferença de metas de conforto para esses dois grupos de usuários.

O questionário de avaliação acústica era composto de 4 seções que avaliariam a quantidade e a qualidade do ruído interno seguindo as etapas descritas:

1ª) O indivíduo foi solicitado a distinguir as gravações após uma única reprodução de todas elas;

2ª) Para cada gravação deveria ser avaliado a aceitação ou não de algum distúrbio, e em seguida indicar a parte que foi mais significativa para a avaliação.

3ª) Análoga à acima, porém focado na aspereza (“roughness”)

4ª) O avaliador foi solicitado a indicar o segmento do carro e o tipo de combustível (gasolina ou diesel).

Para a determinação da percepção de quantidade, usou-se uma escala de -30 a 30, na qual -30 significava alto e 30 baixo, ou para qualidade -30 seria desconfortável e 30 confortável.

Os percursos foram escolhidos de forma a atender alguns quesitos básicos:

- garantir a boa repetitividade;
- representar bem a utilização real do veículo por parte do consumidor;
- garantir todas as condições operacionais;
- descrever o comportamento tanto nas condições de regime permanente quanto transiente.

Para as medições acústicas, os trechos também precisaram ser selecionados em um esquema no qual o ruído interno fosse devido a três importantes fontes:

- presença motor, produzido por componentes do compartimento motor;
- ruído aerodinâmico, particularmente em altas velocidades;
- ruído de rodagem, transferido do pavimento para o interior através das suspensões.

A partir dessas considerações, condições operacionais específicas foram selecionadas a fim de destacar um ruído específico em relação aos outros:

- aclives, evidenciando a presença do motor;
- velocidade constante, para monitorar tanto a presença do motor quanto o ruído aerodinâmico;
- calçamento, para monitorar o ruído de rodagem devido à excitação impulsiva;
- pavimento urbano, para monitorar o ruído de rodagem devido à excitação de um sistema aleatório.

Todos os parâmetros psicoacústicos foram calculados no domínio do tempo durante todas as manobras, para cada interface veículo-humano. A partir dos dados objetivos, foi preciso reduzir e focar os resultados por métodos estatísticos fazendo: primeiro uma análise de

correlação na qual todos os coeficientes dentre todos os parâmetros foram calculados e, quando esse coeficiente era maior que 0,95 para dois deles, um era descartado; segundo, uma análise de variância é realizada a fim de descartar os parâmetros que não apresentavam distinção significativa entre os veículos. O mesmo procedimento foi realizado para selecionar as condições de teste.

Para os dados subjetivos, foram calculadas médias e desvios padrões, o que revelou diferenças substanciais no uso da escala. Para tanto, foi feita, para cada jurado, uma transformação linear para normalizar a um valor médio 0 (zero) e um desvio padrão igual a um.

Mais adiante, uma análise de conjunto foi realizada com o intuito de detectar a eventual presença do uso de um critério particular de avaliação por parte dos jurados. Não foram detectados, porém, quaisquer fatores do tipo e, com isso, os valores médios do júri foram considerados representativos.

Finalmente, uma análise de correlação avaliou a esperada relação entre os parâmetros objetivos com as classificações subjetivas. Uma aproximação por modelo multilinear foi escolhida, na qual cada classificação parcial um subconjunto de parâmetros objetivos foram encontrados cuja combinação linear mostrou uma alta correlação com a classificação em si, R^2 na faixa de 0,83 para regime transiente e 0,90 para regime estacionário. O método estatístico utilizado foi o dos mínimos quadrados.

A partir desses resultados uma metodologia foi consolidada para uso do IQA (índice de qualidade acústica). Os autores propuseram a segmentação desse índice em dois sub-índices:

- Quantidade de ruído interno
- Qualidade do ruído interno

Presume-se que essa classificação permite entender não apenas quando o ruído começa a ser desagradável, mas também qual o tipo de ruído é considerado harmonioso para o cliente, adequado com o veículo e a expectativa existente sobre esse. Cada sub-índice é dividido em:

- IQA motor
- IQA aerodinâmico
- IQA piso irregular

Completando o método, diversas condições de direção foram consideradas tentando reproduzir condições de uso normais: cidade, estrada, etc., e assim tentar entender as causas do ruído interno avaliado.

ALLMAN-WARD et al. (2004) utilizou um simulador de NVH (em desenvolvimento, chamado NoViSim) para fazer comparação entre análise objetiva e subjetiva. Além disso, o objetivo foi criar um simulador para proporcionar ao avaliador um ambiente semelhante ao de um carro de luxo no momento em fosse exposto a estímulos sonoros e vibracionais. Com isso, pretendia-se mostrar que o método apresentado garante melhor acesso aos dados subjetivos do que outros métodos como o de escuta de gravação bi-auricular e o método de estrada (em que o próprio avaliador conduz o veículo).

O simulador permite uma maior consistência da avaliação e boa repetitividade dos resultados, uma vez que os estímulos apresentados para o júri eram semelhantes. O avaliador pode escolher qual veículo deseja avaliar (A, B, C...), em qual condição (livre para conduzir ou condições específicas como AV3 – aceleração veloz em 3ª marcha), e de que forma (como, por exemplo, segunda marcha com aceleração veloz de 50 km/h para identificar ruído que indique potência).

Na avaliação subjetiva, os avaliadores utilizaram uma interface que permitia ajustar os carros com uma barra de rolagem conforme a nota que daria para cada um. Três tipos de testes foram realizados: um feito em sala por meio de reprodução do som em fones de ouvido; outro feito com o simulador; e um último com o simulador, porém com melhorias na interface sugeridas no outro teste com o simulador.

O simulador mostrou-se como método que apresenta resultados mais consistentes (95% dos jurados apresentaram resultados com mais de 80% de consistência). Este resultado, juntamente com outros testes de significância, confirmou que, apesar de complexo, o ambiente multisensorial que existe no simulador de NVH, apresenta resultados, no mínimo, tão confiáveis quanto aqueles realizados em salas acústicas com reprodução sonora.

O trabalho realizado por BAKER et al. (2004), descreve a avaliação do som do ponto de vista da percepção do cliente ao invés da descrição de seus componentes físicos. Com a finalidade de avaliar um objetivo de conforto ou um som existente sobre a ótica de percepção dos

clientes um número de métodos pode ser usado, como o teste de diferencial semântico e o teste de comparação pareada. Ambos dependem do recrutamento de um júri pré-existente e/ou novos clientes.

Testes envolvendo um júri é um exercício demorado e caro. Para cada estímulo sonoro é necessário o recrutamento de muitos jurados. Os jurados por sua vez também possuem pouco tempo disponível, de tal maneira que se tem como resultado um pequeno grupo de avaliadores. Por essa razão, BAKER et al. (2004) explorou uma investigação de métodos para aperfeiçoar ou idealmente substituir tais avaliações. Seguindo um projeto pioneiro adotou com sucesso a utilização do ANN (Artificial Neural Networks – Rede neural artificial) para prever o nível de ruído absoluto para uma veículo com determinados parâmetros de projeto. A fim de desenvolver um ANN é necessário cumprir os seguintes critérios:

- Fornecer à rede neural um conjunto adequado de dados de entrada a partir do qual se possa ter conhecimento do modelo preditivo.
- Fornecer, à rede neural, dados conhecidos suficientes a fim de que o modelo preditivo correto possa ser reconhecido.

No trabalho de BAKER et al. (2004), durante o teste de comparação pareada convencional, também conhecido como “fixed play”, um júri foi submetido a sons apresentados em pares. Primeiramente, eles ouviram o som *i*, e então o som *j* e, em seguida o júri foi perguntado sobre os dois sons com base no questionário. Os votos são calculados sobre o júri para obter a probabilidade pareada para o par de sons *i*, *j*. No final, a soma da probabilidade do som *i* ser preferido em relação ao som *j* com a probabilidade do som *j* ser preferido em relação ao som *i* é igual a 1 de acordo com a EQ. (4.2):

$$p_{i,j} + p_{j,i} = 1 \quad (4.2)$$

No entanto, depois de ouvirem os sons na ordem *i-j*, o júri também foi pedido para escutar mais uma vez o par de sons, porém, na ordem reversa *j-i* e responder o questionário novamente. Ou seja, para uma avaliação de *n* sons, o júri ouvirá *n(n-1)* pares. Essa repetição é feita para ver o quanto a ordem em que os pares são escutados podem afetar a decisão feita pelo jurado e avaliar a repetibilidade dele. O que se espera é que os jurados continuem

votando pelo mesmo caminho sempre, independente da ordem dos pares. Então, pela contagem do número de vezes que o jurado selecionou no mesmo som de um dado par (em ambas as ordem colocadas), a repetibilidade pode ser calculada pela EQ. (4.3):

$$\text{Repetibilidade (\%)} = 100 \times \frac{\text{Número da comparação julgada}}{\text{Número total de comparações}} \quad (4.3)$$

O problema existe quando o jurado não escolhe o mesmo caminho para um par repetido, levando a um conjunto incoerente de probabilidade de pares, como exemplo (EQ. 4.4):

$$p_{i,j} + p_{j,i} \neq 1 \quad (4.4)$$

Isso resulta em um número par de probabilidades potenciais que poderiam ser usadas para treinar uma ANN, dado pela EQ. (4.5):

$$p_{i,j} \quad \text{ou} \quad 1 - p_{j,i} \quad \text{ou} \quad \frac{p_{i,j} + (1 - p_{j,i})}{2} \quad (4.5)$$

Usar a probabilidade dos pares desta maneira para treinar uma ANN pode levar a alguns problemas. Uma escolha incorreta das probabilidades poderia levar a ANN ao efeito da ordem de execução dos pares. No entanto, se o efeito da ordem de execução pode ser removido, então este problema pode ser superado apenas com um par de probabilidades existente: p_{ij} .

Já o método “freeplay” não considera a ordem de execução como uma variável. Diferentemente do teste de comparação de pares tradicional, em que o júri escuta o som i seguido do som j, e então são convidados a fazer uma escolha, o jurado tem o controle total da ordem de execução e do número de vezes que o jurado escuta os sons. Em termos práticos, o jurado tem um botão para cada som do par e ele pode escutar e re-escutar quantas vezes for necessário e em qualquer ordem até que ele esteja satisfeito com a sua avaliação. Dessa forma, a variável de ordem de execução pode ser removida do problema.

Além disso, o método “freeplay” tem algumas outras vantagens excluindo, por exemplo, a necessidade de executar os pares de sons em uma ordem reversa, reduzindo o número de pares apresentados pela metade em relação ao teste de comparação pareada de “fixed play”.

Pode-se dizer também que o nível de aumento da interação dos jurados pode levar a uma melhora na fixação da memória. Dado que os jurados podem executar um mesmo som quantas vezes desejarem, pode-se afirmar que as respostas são mais repetíveis e consistentes.

BAKER et al. (2004) formaram um júri com 12 pessoas que nunca haviam feito o teste de comparação pareada. Os jurados foram divididos aleatoriamente em dois grupos. Cada grupo completou dois testes de comparação pareada para um grupo idêntico de som. O primeiro grupo completou o “fixed play” primeiro, seguido pelo “freeplay”, e o segundo grupo realizou na ordem contrária. Existiu um intervalo de um dia para os dois testes a fim de evitar que os jurados decorassem os sons.

Dois grupos foram utilizados para assegurar que qualquer diferença nos resultados seria mais indicativa da diferença quanto ao tipo de teste do que a ordem (ou número) de testes completados. Os jurados responderam um questionário depois de cada teste. O objetivo do questionário foi deduzir o quanto o jurado se sentia envolvido no teste e suas respectivas facilidades em fazer uma distinção entre os sons.

Os resultados dos dois métodos foram comparados com base na repetibilidade individual dos jurados e as medidas de estabilidade. A estabilidade do jurado pode ser indicativa da confiabilidade das respostas dadas por eles. Os resultados mostraram que a ordem do teste tem um efeito, o que pode indicar que os jurados estavam decorando o teste e, em especial definindo o que faz com que eles determinem um som refinado ou poderoso neste caso. Nesse contexto, os resultados que mostraram melhores medidas de estabilidade e de repetibilidade foi o “freeplay” quando comparado ao “fixed play”, independente da ordem dos testes.

Para finalizar seu trabalho, BAKER et al (2004), concluíram que os resultados apresentados indicam que a medida de repetibilidade e de estabilidade do jurado é aperfeiçoada com o uso do “freeplay”, dentro do teste de comparação pareada, em até 20%. Isso acontece devido à natureza do “freeplay” e não em relação à experiência do jurado. Isso pode significar que menos jurados podem ser recrutados para encontrar um número com repetibilidade aceitável e estabilidade. A estabilidade aumentada irá resultar em um melhor nível de confiança nas classificações. A retenção de dados feita pelo jurado também pode ser melhorada: as respostas do questionário indicaram que todos os jurados se sentiram mais envolvidos no teste “freeplay”.

Em 2004 GERGES et al. direcionou um estudo para ruídos como rangidos e estalos gerados no interior do veículo, uma vez que com o desenvolvimento de motores e transmissões mais silenciosos e suaves essas fontes de ruído na maioria das vezes relacionadas aos painéis, fixações e revestimentos começaram a ganhar maior importância.

Fazendo-se uma análise da composição desse tipo de ruído, observou-se que os rangidos apresentavam mais impactos que ruídos em baixa frequência. Desta forma, seu estudo apontou a métrica “sharpness” como um bom parâmetro para estimar a percepção do consumidor em relação ao que representa um carro com alta quilometragem (no qual esse tipo de ruído é ainda mais presente).

Em 2004 FRY et al., em seu estudo sobre a decisão dos clientes em relação a qualidade sonora dos produtos, verificou que o teste de pares comparados era uma ferramenta simples apropriada a não-especialistas. Em seu experimento foi apresentado ao sujeito um par de estímulos e em seguida solicitado que fosse indicada uma resposta ao questionário.

Aos jurados também foi perguntado o quão difícil foi fazer a distinção de som que indicassem “potência” do veículo. Isto permitiu que fossem rapidamente identificados quais pares eram mais fáceis de avaliar, uma vez que estes são menos interessantes para se entender a razão da escolha do jurado.

No trabalho realizado por SANG-KNOW et al (2005), foi feita a medição do ruído interno de 14 veículos de passageiro e 21 pessoas avaliaram subjetivamente a qualidade do “rumbling sound”. “Rumbling sound” é uma das mais importantes qualidades sonoras no carro de passageiro. O “rumbling index” tem sido utilizado com sucesso para a avaliação objetiva de qualidade de “rumbling sound” em carros de passageiro produzido em escala.

Numa pesquisa prévia, em um método objetivo de classificação para a qualidade de “rumbling sound”, foi concluído que esta qualidade é relacionada ao principal componente de estrondo (“rumble”). Na pesquisa realizada por SANG-KNOW et al. (2005) conseguiu-se relacionar a qualidade de “rumbling sound” não somente com o componente principal de estrondo, mas também com o “loudness” e o “roughness”, adotando assim o uso dessas métricas para o desenvolvimento do “rumbling index”.

No desenvolvimento da pesquisa foram captados 240 sons artificiais para construção de uma rede neural artificial (ANN). Destes sons, foram usados 170 para uma avaliação subjetiva feita por 21 passageiros (17 homens e 4 mulheres).

Um sistema de reprodução e fones de ouvido foi usado para a avaliação subjetiva. Os 170 sons interiores foram aleatoriamente avaliados. Para a avaliação subjetiva foi utilizada uma classificação com os parâmetros variando de 4 a 9, sendo o valor 4 associado a “impossível de desenvolver” e o valor 9 associado ao conceito “muito excelente”.

As métricas sonoras para os 170 ruídos interiores foram calculadas e usadas como dados de entrada do ANN para posterior cálculo do “rumbling index”. Quatro métricas sonoras principais foram usadas, dentre estas o “loudness”, “roughness”, “sharpness” e “fluctuation strength”, além da componente principal do estrondo (“rumble”). Esses resultados foram usados como dados de entrada do ANN para ser usado como “rumbling index”.

Na análise psicoacústica para os 170 sons internos, tanto o componente principal quanto o “loudness” se mostraram muito bem relacionados com a avaliação subjetiva do “rumbling sounds”. A métrica “roughness” não se mostrou tão clara para uma correlação com o “rumbling sound”. “Sharpness” e “flutuation strength” não são relacionados à percepção humana do “rumbling sound”. Para confirmar esses resultados, a correlação entre as métricas sonoras e a avaliação subjetiva foi calculada. De acordo com os resultados, o valor do componente principal de ruído tem alta correlação com a classificação subjetiva de 156 sons artificiais, mas tem baixa correlação para sons de carros reais. Já o “roughness” possui uma correlação alta com a classificação subjetiva para os sons do carro real e sons artificiais, mas ainda não se sabe uma razão para essa correlação com a classificação subjetiva.

A metodologia da ANN foi aplicada no desenvolvimento de um índice de perturbação ou incômodo para a análise da qualidade sonora de um mecanismo ou automóvel. Neste caso, foi utilizado para o desenvolvimento de um “rumbling index” para carro de passageiro o modelo de ANN de múltiplos caminhos (FIG. 4.1).

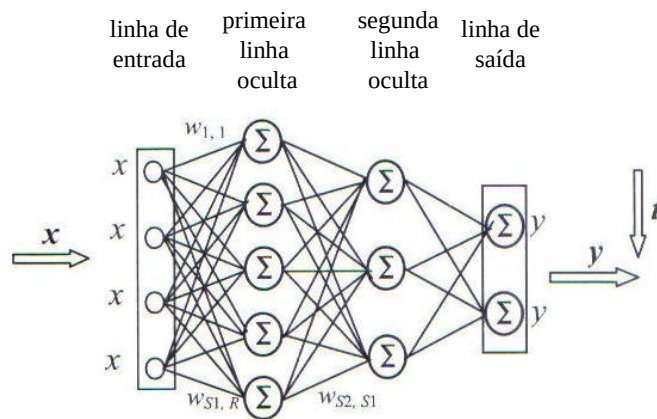


FIGURA 4.1 – Rede neural artificial de múltiplos caminhos

FONTE: SANG-KNOW et al., 2005

Um dos principais trabalhos foi a determinação dos pesos ou valores ótimos das conexões ($w_{i,j}$). A média da avaliação subjetiva e as métricas sonoras para os 156 sons interiores artificiais são utilizadas para a determinação dos valores ($w_{i,j}$) de conexões para ANN. Inicialmente, o valor de “loudness” e da componente principal do “rumble” dos 156 sons artificiais são usados como dados de entrada para instrução da ANN. Em segundo lugar, “loudness” e “roughness” são colocados como parâmetros de entrada.

No primeiro caso, os resultados emitidos pelo ANN, no qual é uma avaliação objetiva da qualidade de “rumbling sound”, não teve uma correlação suficiente com a avaliação subjetiva no carro real. Portanto, o “loudness” e o “roughness” da metade de 156 sons artificiais foram usados como entrada para formação do ANN. É verificado que tanto o “loudness” quanto o “roughness” tem uma relação com a média de avaliações subjetivas desses sons. A média de avaliação subjetiva desses sons passa então a ser usada como alvo para o ANN.

Em particular, a métrica “roughness” ao invés do componente de “rumble” foi necessária para se obter uma boa correlação. A correlação entre a resposta neural e a média das avaliações subjetivas foi de 91,6%. Concluiu-se que essa resposta do ANN experimentado pode ser usada como o “rumbling index” para os sons da parte interna do carro de passageiro. Isso pode ser confirmado com a aplicação do ANN experimental para computar as avaliações subjetivas da qualidade do “rumbling sound” dos sons internos de 14 carros de passageiro. A resposta dada pelo ANN tem 89,2% de correlação com a média das avaliações subjetivas feitas por 21 passageiros.

Em 2006 ZEITLER e ZELLER utilizaram treze veículos de diversas categorias. Os participantes avaliaram primeiro um percurso em pista de teste em velocidade constante de 100 km/h e posteriormente, em acelerações de 100 a 140 km/h.

Foram solicitadas 12 pessoas para participarem dos testes sendo todos esses profissionais da área, uma vez que a ideia principal era caracterizar a avaliação sensorial ao invés de julgamentos de preferência. Os participantes foram solicitados a realizar as avaliações em dois blocos em dias separados.

Nesse experimento a técnica utilizada foi a do diferencial semântico, composto por 20 unidades de classificação ancoradas por adjetivos opostos nos extremos (exemplo, forte-fraco). Antes de irem para a estrada, os participantes fizeram treinamentos para o uso da escala de adjetivos em condições controladas.

Correlações foram feitas utilizando medidas acústicas (nível, ordem de espectro) e psicoacústicas (“loudness”, “sharpness”, “roughness”, etc.). Primeiramente, foi feita a correlação conforto/”loudness” com o índice global de ruído em dB(A) e para essa correlação foi obtido um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,729. Além disso, verificou-se que a escala de conforto esteve de acordo com os requisitos específicos dos veículos, os sedans de luxo tiveram as maiores notas enquanto os esportivos tiveram as menores.

Para a métrica “roughness”, a sensação descrita foi de suave a áspero. A correlação entre percepção de conforto/”loudness” e “roughness” foi de R^2 igual a 0,581. Para o sharpness, os limites foram expressos através dos adjetivos de leve a agudo. A correlação obtida entre percepção de conforto/”loudness” e “sharpness” foi de R^2 igual a 0,631.

O índice inteligibilidade (articulação) foi calculado como proposto por THOMA e BISPING apud ZEITLER e ZELLER (2006). O índice de articulação explicou o conforto/”loudness” percebido em 73,3%.

Por último, uma análise de regressão foi feita para prever as notas de conforto/”loudness” por meio de combinações lineares dos parâmetros citados. Observou-se que esse modelo de regressão apresentou uma melhor previsão quando comparado com os parâmetros individuais com um R^2 igual a 0,765 (GRA. 4.3)).

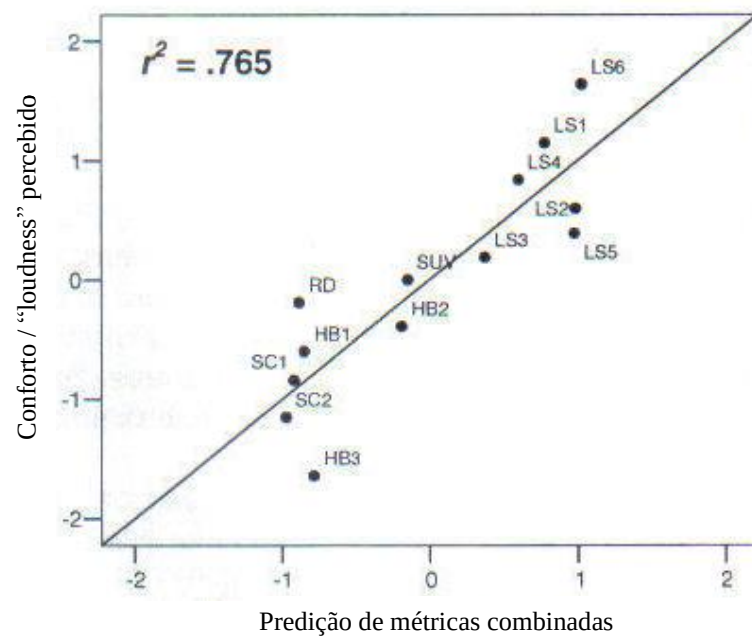


GRÁFICO 4.3 – Predição do conforto / “loudness” x parâmetros subjetivos e métricas psicoacústica

FONTE: ZEITLER e ZELLER., 2006

Outras correlações também foram feitas, como, por exemplo, com a métrica “harshness”. O algoritmo proposto por MARTNER et al. apud ZEITLER e ZELLER (2006) foi usado por ser específico para se detectar aspereza do motor (realiza os cálculos com filtros dependentes do regime de rotação considerando as mudanças dinâmicas na percepção auditiva). A correlação obtida para “harshness” percebido foi de 67,4%.

Ainda em seu trabalho ZEITLER e ZELLER (2006) realizaram outro experimento para determinar a confiança das correlações encontradas no estudo anterior. Por último, um estudo também foi realizado para explorar a significância do aumento do nível sonoro do motor devido ao aumento de carga para a impressão de esportividade.

Em um estudo na Malásia realizado por NOR et al. (2007), no qual foram feitos testes de percepção de conforto acústico vibracional, foi detectado que dentre os 17 itens investigados, 37% dos participantes votaram como incômodo o ruído do motor em marcha lenta, enquanto 32% para ruído do motor em aceleração. Pequenos níveis de desconfortos foram mais percebidos por mulheres do que homens. O fator idade demonstrou uma tendência diferente nas respostas. Itens relacionados à vibração mostraram-se mais desconfortáveis ao público feminino. Embora tenham sido percebidas algumas influências dos fatores idade e gênero no

resultados da pesquisa, o autor afirmar que os dados apresentados podem ser vistos apenas como porcentagem, visto que não são significantes estatisticamente.

Em 2008 MORILLAS et al. utilizou a gravação bi-auricular como ferramenta de análise para 25 pessoas, afim de se obter uma relação entre dois parâmetros psicoacústicos (“loudness” e “sharpness”) e a medição clássica de nível (dB(A)). Foram utilizadas duas formas de caracterização da qualidade do som de confortável a desconfortável: uma por meio de definição da qualidade por palavras, ou escala verbal (de muito agradável a muito desagradável) e outra por uma escala numérica (de 1 a 7). Com os resultados, foram relacionados os valores subjetivos no eixo das ordenadas e os resultados obtidos objetivamente no eixo das abscissas.

Observa-se em seus resultados que os coeficientes de determinação (R^2) obtidos por um ajuste linear dos resultados foram menores para o ajuste utilizando a escala verbal do que quando comparada com a escala numérica. Não foram observadas correlações entre os três parâmetros acústicos estudados e a sensação de ser agradável. O único índice que correlacionou significativamente com todas as três grandezas estatísticas foi o de “sharpness” (muito significativo com a moda, e significativo com a média e a mediana).

NOR et al. (2008) desenvolveu um estudo para o projeto de qualidade sonora considerando todas as condições de operação possíveis na determinação da acústica do veículo de um modelo ideal. Para determinação da qualidade sonora foi definido uma perturbação ou um índice específico que envolve medidas subjetivas e objetivas, simultaneamente.

Foi realizado um teste subjetivo com 16 pessoas com habilidades normais de audição. Através da utilização de um fone de ouvido, todos os participantes tiveram o mesmo tempo de exposição a um determinado som.

Alguns métodos foram usados para a avaliação subjetiva como o teste de comparação pareada (envolve uma sequência de pares de sons que serão posteriormente comparados), teste do diferencial semântico (deixa o ouvinte avaliar as propriedades do som de acordo com uma escala pré-definida) e a escala de classificação (usa-se somente uma escala para avaliar o veículo).

Nos testes objetivos foram calculados o “loudness”, “fluctuation strength”, “roughness” e “sharpness”. A medição foi realizada em todo o espectro considerando a percepção humana.

O teste subjetivo da qualidade sonora no interior do veículo foi obtido diretamente a partir da avaliação de um júri, enquanto medida de prova objetiva foi feita por meio de parâmetros auditivos relacionados. Através da combinação dessas aproximações foram desenvolvidas equações necessárias para se obter o Índice de Conforto Acústico Veicular (VACI);

Ainda no trabalho de NOR et al (2008) foi feita uma comparação entre a rugosidade de uma superfície e o VACI encontrado. Para a aspereza percebida em um determinado tipo de pavimento são atribuídas três fontes: a rugosidade da superfície, a suspensão do veículo e o comportamento do motorista. Ao verificar a influência desses três parâmetros, foi verificado que a rugosidade desempenhava um papel muito maior que o dos outros dois.

Para avaliação desse parâmetro as medições foram realizadas em diferentes tipos de estrada e velocidades. Incluíram-se os parâmetros: O “international roughness index” (IRI), relacionado a qualidade global do trajeto e as condições de superfície e a curtose que é uma medida da impulsividade de distribuição do sinal no domínio do tempo. O método de curtose exagera o impulso do som e geralmente está associada à uma má qualidade do som.

As medições e análise das condições da estrada que contribuíram com parâmetros e correlações com o índice de conforto acústico forneceram informações úteis sobre o efeito que a rugosidade da estrada tem sobre a percepção auditiva do passageiro.

Para desenvolvimento do VACI foram calculadas as métricas objetivas “loudness”, “sharpness”, “roughness”, “fluctuation strength”. Para o teste subjetivo foi feito o uso de uma escala numerada de 1 a 5, sendo 5 para mais agradável e 1 para maior estado de perturbação.

As métricas de qualidade sonora foram relacionadas com diferentes velocidades do veículo. Uma média da avaliação subjetiva de todos os participantes para cada velocidade foi calculada e utilizada como referência de avaliação subjetiva. Como a intenção era encontrar uma relação entre cada métrica de qualidade sonora e o fator de conforto acústico do veículo, foi feito o desenvolvimento da análise de regressão e calculados os fatores de correlação individualmente para cada métrica.

O índice de conforto acústico veicular (VACI) foi determinado pela EQ. (4.6) abaixo:

$$VACI = \sum c_j \cdot Q_j + cte \quad (4.6)$$

Na qual:

c_j é o coeficiente para j-ésima métrica de qualidade sonora

Q_j é o valor calculado para j-ésima métrica de qualidade sonora

cte é a constante da regressão linear.

Como principais resultados, observações e conclusões verificou-se que a métrica “loudness” foi a que obteve a maior correção com a avaliação subjetiva (R^2 entre 0,84 e 0,93), sendo essa uma relação inversa; quanto mais alto o “loudness”, menor era o conforto acústico percebido.

O “sharpness” teve uma correlação média com a avaliação subjetiva (R^2 entre 0,77 e 0,99), enquanto o “roughness” não obteve quase nenhuma (R^2 entre 0,05 e 0,21) com exceção para superfície urbana suave no qual obteve um R^2 igual 0,81. Esses resultados podem ser observados nos parâmetros de R^2 calculados para cada métrica (GRA. 4.4):

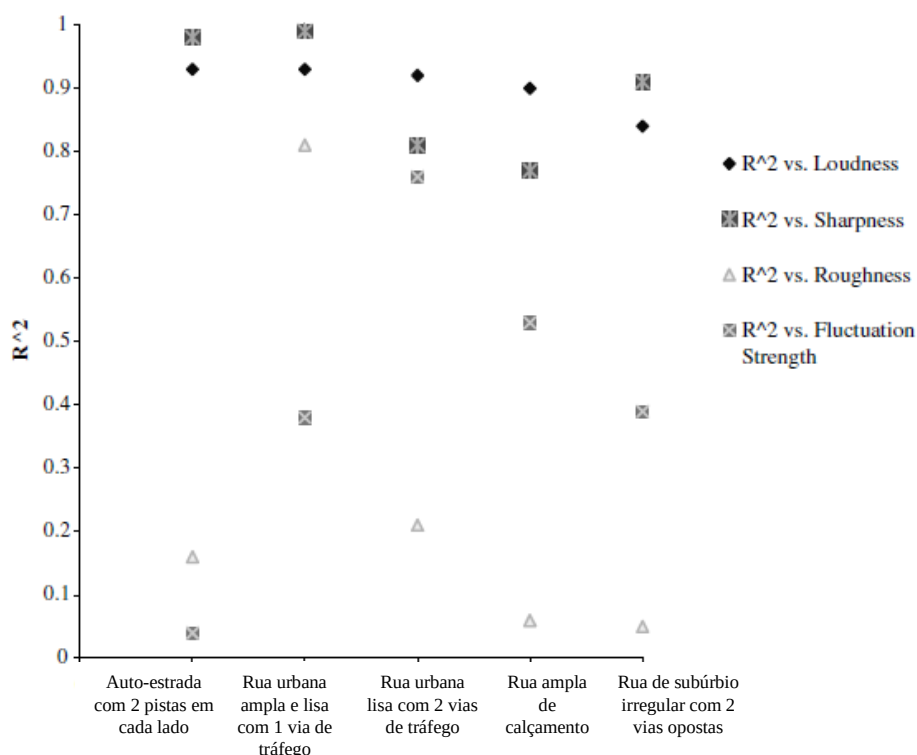


GRÁFICO 4.4 – Coeficientes R^2 de parâmetros psicoacústicos x tipo de pavimento

FONTE: NOR et al., 2008

Observou-se também que em velocidades constantes, a curtose foi melhor em estradas com alto valor de rugosidade. A curtose é proporcional a velocidade em qualquer tipo de via e tem um efeito inverso no valor da avaliação subjetiva.

Em estradas com alta rugosidade a nota de avaliação subjetiva é menor que em vias de baixa rugosidade. O ouvido humano percebe altos picos e impulsos quando está transitando em uma via de alta rugosidade.

Em 2010, BERGERON et al. verificou que para a avaliação da qualidade sonora no interior de um veículo utilizando a ciência sensorial era fundamental o uso de um público especialista em acústica. Segundo seu trabalho, esse tipo de júri é significativamente mais capaz de transmitir de uma forma melhor e mais concisa a informação de sensação devido ao estímulo sonoro.

4.3 Principais contribuições

Das referências apresentadas, algumas são destacadas no que se referem às suas contribuições para o desenvolvimento desse estudo.

Os trabalhos de MATHIAS (1995), ZEITLER e ZELLER (2006) auxiliaram na definição das métricas psicoacústicas, bem como dos demais parâmetros adotados para a caracterização objetiva do conforto acústico. Enquanto BERGERON et al. 2010 embasaram algumas premissas para escolha e determinação da amostra de avaliadores.

Já NOR et al. (2008), RENZO et al. (2004) e ZEITLER e ZELLER (2006) contribuíram, de alguma forma, para definição do método de correlação entre os dados objetivos e subjetivos, bem como a definição geral de uma metodologia para determinação de um índice de conforto.

Outros trabalhos como os de PFLUEGER et al. (1998), GERGES et al. (2004), GERGES et al. (2003) contribuíram para análise e interpretação dos resultados.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é dedicado à descrição dos veículos e dispositivos utilizados nas realizações dos testes, segundo o procedimento experimental adotado. Os testes foram realizados em vias públicas nacionais nos municípios de Belo Horizonte, Nova Lima e Brumadinho. O capítulo inicia com a descrição dos veículos, da sua seleção e composição e dos instrumentos de medição e de aquisição de dados. Em seguida, é apresentado o procedimento experimental utilizado nos ensaios. Finalmente, é descrita a metodologia utilizada para avaliação do desempenho e criação de um índice de conforto acústico.

5.1 Dispositivo Experimental

O trabalho foi desenvolvido a partir da avaliação acústica e vibracional de 5 veículos classificados tradicionalmente pelo setor automobilístico como segmento B “Premium”, o qual é caracterizado por “hatches” médio-pequenos com motores acima de 1000 cilindradas. A escolha desse segmento foi baseada na sua representatividade e importância no atual mercado automobilístico brasileiro.

Para seleção final dos 5 veículos foi considerada o resultado de uma pesquisa realizada por uma empresa externa contratada pelo Clube de Montadoras no Brasil, que tem como objetivo conhecer a qualidade dos veículos e marcas pelos clientes. Nessa pesquisa são abordadas diversas características dentre essas alguns problemas de acústica que são frequentemente reclamados pelos clientes: ruídos de fechamento de portas, ruídos de vento / infiltração de ar sobre portas, vidros laterais, para-brisas, teto solar, saídas de ar do sistema de climatização, ruído de motor e ruído de pneus. A partir do resultado dessa pesquisa foram selecionados os veículos mais representativos do mercado nesse segmento, buscando aqueles que apresentavam do maior ao menor número de reclamações de ruído, limitando em 5 unidades devido a viabilidade operacional da pesquisa.

A TAB. 5.1 apresenta as principais características dos veículos selecionadas. Alguns parâmetros que poderiam eventualmente causar alguma variação na avaliação subjetiva e ou objetiva dos veículos foram padronizados, a fim de minimizar influências nos resultados.

Dentre esses foram padronizados que todos os veículos deveriam conter a mesma cor, sistema de climatização, direção assistida, “air bag” motorista, roda em chapa de aço comum, vidro elétrico. Para esse trabalho foram adquiridos veículos novos, tendo sido realizada uma rodagem previa de aproximadamente 2000 km, sob condições padronizadas de circuito para os 5 modelos. Apesar de todos os veículos serem bicom bustíveis, todos os ensaios foram realizados com abastecimento à etanol.

TABELA 5.1 – Características básicas dos veículos testados

Veículo	Motorização (cilindradas)	Potência (CV)	Pneus (mm-%-cm)
A	1.4 (1389) 8V	102	185/60R15
B	1.4 (1360) 8V	82	185/60R15
C	1.6 (1598) 8V	104	195/55R15
D	1.4 (1368) 8V	86	195/60R15
E	1.6 (1598) 8V	95	185/65R15

5.1.1 Instrumentação

Os veículos foram instrumentados com medidores de nível de pressão sonora, vibração, velocidade e rotação, além de dispositivo de gravação de imagem. A descrição dos equipamentos é apresentada a seguir.

5.1.1.1 Medição de ruído

Para medição do nível de pressão sonora foi utilizado o sistema HMS III. 1 – “Head Measure System” fabricado pela Head Acoustics GmbH, no qual a gravação de sinais sonoros é realizada via uma “cabeça” artificial (“Artificial Head”) (FIG. 5.1).

Os eventos sonoros foram gravados por dois microfones eletrostáticos extremamente sensíveis localizados em ambos os canais de audição da “cabeça”. Os sinais são captados e filtrados através de funções de transferência do “head-related” de acordo com a direção de incidência do som. Abaixo algumas características dos microfones utilizados:

Nível de pressão sonora – microfone do lado esquerdo – 123,86 dB +/- 0,1dB

Nível de pressão sonora – microfone do lado direito – 123,83 dB +/- 0,1dB

Carta de calibração:

- sensibilidade = -25,8dB re 1V/Pa (equivalente a 51,5 mV/Pa)
- capacitância = 17,5 pF

Condições de Calibração:

- voltagem de Polarização = 200 V



FIGURA 5.1– Sistema de medição acústica (HMS – III)

FONTE: Catálogo Head Acoustics GmbH

5.1.1.2 Medição de vibração

Para medição dos níveis de vibração foram utilizados acelerômetros triaxiais isotron® modelo 65HT-10-X (Y) (Z), fabricado pela Endevco, com as seguintes sensibilidades de 10,36 mV/g, 10,23 mV/g e 10,34 mV/g a 100 Hz, 10g pk respectivamente nas direções X, Y e Z (FIG. 5.2). Os sensores são calibrados pelo próprio fabricante Endevco divisão da Meggitt Califórnia USA, com incerteza estimada de +/- 1,5% $20 < f \leq 100$ Hz, +/- 1,2% $100 < f \leq 2500$ Hz, +/- 2,5% $2500 < f \leq 10000$ Hz, +/- 5,0% $10000 < f \leq 20000$ Hz, correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.



FIGURA 5.2 – Acelerômetro triaxial isotron® Endevco

FONTE: Catálogo Endevco

5.1.1.3 Medição de velocidade

Para registro da velocidade foi utilizado uma rodafônica, modelo RF67-30, com alimentação 10÷30 VDC (FIG. 5.3). O sensor de velocidade é capaz de converter (codificar) uma posição mecânica em um sinal (30 pulsos/giro). A rodafônica utilizada tem como princípio de funcionamento um gerador DC de imã permanente acoplado mecanicamente ao eixo que se deseja medir a velocidade, sendo necessário o conhecimento do diâmetro da roda em questão. O gerador de saída gera uma tensão de saída que é proporcional a velocidade do seu eixo.



FIGURA 5.3 – Rodafônica

5.1.1.4 Medição de rotação

Para aquisição do sinal de rotação foi utilizado um tacômetro digital, modelo Moviport C118, fabricado pela Braun GmbH (FIG. 5.4). Esse equipamento possui uma precisão de $\pm 0,05\% + 1$ no último dígito ativo, operando em condições de temperatura de -10 a $+55^{\circ}\text{C}$.

O funcionamento do tacômetro digital baseia-se na conversão da média de pulsos de entrada, fornecidas por um sensor durante o tempo de amostragem, em um valor legível no display do aparelho. O tacômetro mede a velocidade angular de um eixo giratório. Portanto, o tacômetro reflete a velocidade do motor através da medição da velocidade rotacional do eixo virabrequim. A velocidade do motor é dada em rotações por minuto (rpm).



FIGURA 5.4 – Tacômetro digital

FONTE: Catálogo Braun GmbH

5.1.1.5 Gravação de imagens

Para gravação de imagens foi utilizada uma câmara fotográfica / filmadora digital, modelo Cyber-shot DSC-HX1, lente Lens G 2.8-5.2/5.0-100.0, fabricado pela Sony (FIG. 5.5). A medição objetiva dos 5 veículos foi gravada durante todo o percurso. O objetivo principal da gravação foi a possibilidade de poder retirar eventuais interferências (passagem de outros veículos, ruído aleatórios, etc.) dos sinais coletados.



FIGURA 5.5 – Câmera fotográfica e filmadora

FONTE: Catálogo Sony

5.1.2 Sistema de Aquisição de Dados

5.1.2.1 Aquisição de ruído

Os dados de ruído foram coletados e digitalmente gravados via DAT (digital áudio tape) através do TASCAM DAT Recorder, fabricado pela Head Acoustics GmbH (FIG. 5.6). O sinal gravado é adaptado dinamicamente pela equalização e faixa de ajuste da “cabeça” artificial. Os pulsos de rotação e velocidade são alimentados no sinal digital via eletrônica incorporada à “cabeça” artificial. O sistema realiza um processamento de sinal em uma vasta gama de amplitude e compensação.

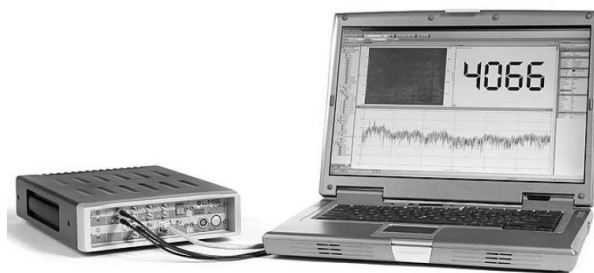


FIGURA 5.6 – Sistema de aquisição e gravação de ruído

FONTE: Catálogo Head Acoustics GmbH

5.1.2.2 Aquisição de vibração

Para aquisição dos dados de vibração foi utilizado o hardware SCADAS móvel, modelo SCM01, fabricado pela LMS – Engineering Innovation. O sistema possui taxa de amostragem de até 102,4 kHz por canal, resolução de 24bits, razão sinal-ruído de 105dB, “throughput” rate de 2,2M amostras/s, demais características podem ser visualizadas na FIG. 5.7. Esse modelo contempla ainda um módulo de interface com o tacômetro que permite o monitoramento da rotação confrontando esse com a aquisição espectral / oitava. São suportados sinais de rotação até 15kHz e 1024 pulsos por revolução. O sistema possui também entradas para sinal de velocidade e ruído.



LMS SCADAS Mobile SCM01	
Number of slots	2 (1 for system controller)
Max number of channels per frame	8
Tacho inputs	2 (standard on board)
Generator outputs	2 (standard on board)
Dimensions (WxHxD)	203 x 58 x 260 mm / 7.99 x 2.28 x 10.24 inch
Weight	2.5kg / 5.59lbs
AC power input	110/220V
DC power input	9-36V
Max power consumption	15W
Battery operation (minimum)	2.5 hours
Host interface	Ethernet
Operating temperature	-10°C to +55°C / 14° to 131°F
Sensor type	V, ICP, MIC, charge, strain, digital audio

FIGURA 5.7 – Sistema de aquisição e gravação de vibração

FONTE: Catálogo LMS Engineering Innovation

5.1.3 Câmara Acústica

As medições foram realizadas em câmara acústica no Laboratório de Acústica e Vibrações da FIAT Automóveis S/A, em Betim - MG. A câmara tem dimensões de 9,7 m de comprimento, 7,6 m de largura e 4,6 m de altura, isolada do ambiente externo e com frequência de corte de aproximadamente 150 Hz. Suas paredes são revestidas com painéis compostos por lã de vidro, tecido de lã de vidro e chapa perfurada. A câmara é equipada com 01 dinamômetro de rolo duplo com potência de 200 HP.

5.2 Procedimento experimental

5.2.1 Coleta de dados

Foram coletados dados denominados como objetivos (provenientes de medição de grandeza física) e subjetivos (notas dadas por avaliadores mediante a sensação de conforto ou desconforto percebida).

5.2.1.1 Dados objetivos

Os veículos foram instrumentados com medidores de nível de ruído, vibração, velocidade, rotação e imagem.

Para aquisição de ruído o sistema de registro binaural ou “cabeça” artificial foi posicionado na posição do passageiro anterior. Os sinais gravados referem-se ao ouvido esquerdo (ponto 1) e direito (ponto 2) da “cabeça”. O banco foi posicionado na metade do seu curso (trilho) e o encosto colocado na vertical (FIG. 5.8).

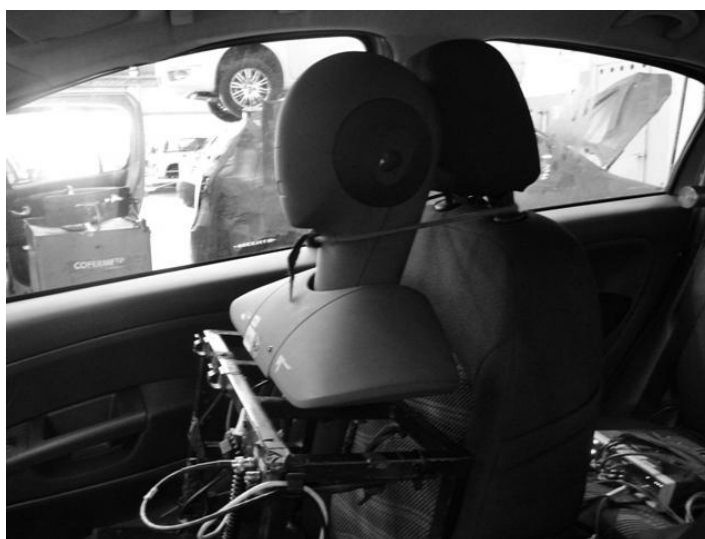


FIGURA 5.8 – Posição do sistema de medição acústica

Os acelerômetros foram instalados no pavimento do veículo – lado motorista (ponto 3), no volante – posição superior (ponto 4) e na alavanca de câmbio (ponto 5) (FIG. 5.9, 5.10 e 5.11). No ponto 3, por uma limitação do número de canais do sistema, a aquisição foi realizada apenas na direção Z. Já nos pontos 4 e 5 foram registrados nas direções X, Y e Z. Na medição de vibração do pavimento, devido a impossibilidade de se retirar o revestimento do piso e a dificuldade de aderência do sensor, foi utilizada uma base metálica para instalação do sensor.

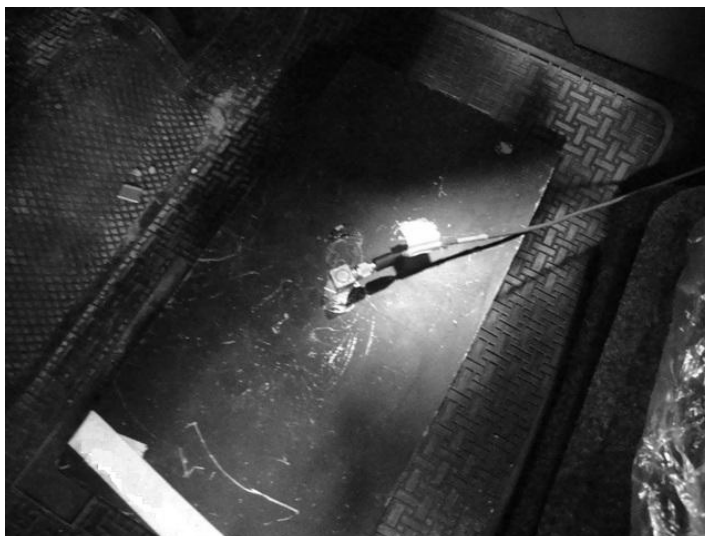


FIGURA 5.9 – Posição do sensor de vibração no pavimento (ponto 3)

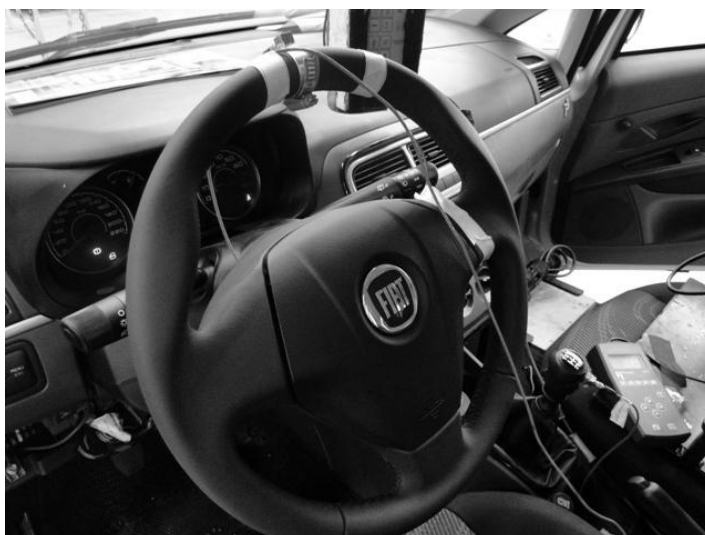


FIGURA 5.10 – Posição do sensor de vibração no volante (ponto 4)



FIGURA 5.11 – Posição do sensor de vibração na alavanca de câmbio (ponto 5)

Dados de velocidade e rotação foram registrados respectivamente com a instalação de rodafônica na roda direita traseira (FIG. 5.12) e do tacômetro que converte o sinal impulsivo extraído da central de injeção em uma frequência associada a rotação do motor (na FIG. 5.13 é apresentado apenas o display do tacômetro instalado sobre o para-brisa).



FIGURA 5.12 – Posição da rodafônica (leitura de velocidade)



FIGURA 5.13 – Posição do tacômetro (leitura de rotação)

Para viabilização da pesquisa cada veículo foi caracterizado objetivamente uma única vez, e em momentos distintos da avaliação subjetiva. A quantidade de equipamentos disponíveis, tempo de instrumentação, tempo disponível dos avaliadores, posição de sensores em pontos como volante, alavanca de câmbio, etc., necessidade de entrevistadores presentes no veículo durante todo experimento x espaço disponível, foram alguns dos fatores que impossibilitaram a aquisição de dados objetivos simultaneamente em cada avaliação subjetiva.

5.2.1.2 Dados subjetivos

Os dados subjetivos foram coletados a partir de um questionário respondido por um público de 33 avaliadores.

A seleção e tamanho da amostra foram determinados dentre outros motivos por limitações operacionais e de viabilidade da pesquisa. Dentre as características da amostra, dos 33 avaliadores 23 foram considerados como público técnico e 10 como público especialista.

Como público técnico entende-se aquele que tem conhecimento do segmento automotivo, bem como de algumas características técnicas dos veículos. Já o especialista além de conhecimento automotivo tem experiência também na área de NVH.

Para avaliação dos veículos foi elaborado um questionário (ver Apêndice A) baseado em três premissas básicas:

- Conseguir traduzir a informação desejada em um conjunto de questões específicas, de tal modo que os entrevistados tenham condições de responder;
- Conseguir motivar e incentivar o entrevistado a se deixar envolver pelo assunto, cooperando e completando a entrevista;
- Conseguir minimizar o erro na resposta. Respostas imprecisas, não registradas ou analisadas incorretamente podem comprometer a decisão final.

A partir dessas definições, experiências de profissionais da área de NVH (âmbito acadêmico e industrial) e assessoria de uma empresa de consultoria em estatísticas e pesquisa (CONEST) o questionário final foi estruturado em 5 partes:

- Seleção: foram levantados dados essenciais e até mesmo excludentes para a seleção da amostra como tempo de habilitação, conforto ao dirigir, problemas de audição, sexo, idade, frequência de utilização do veículo, área de atuação profissional.
- Perfil: foram levantadas características dos avaliadores que de alguma forma pudessem influenciar em suas respostas, tais como: horas de sono na última noite, consumo de bebida alcoólica nas últimas 12 horas, consumo de remédio, cansaço, frequência com a qual dirige em determinados tipos de estradas, tempo de direção por dia, uso de ar condicionado, rádio,

janela aberta, atributos que considera importante na escolha de um automóvel, importância atribuída ao conforto acústico e vibracional.

- Avaliação do veículo por percurso: foram atribuídas notas para cada veículo avaliado ao final de cada trecho do circuito (calçamento, estrada e urbano). As notas atribuídas foram de 1 (péssimo) a 7 (excelente) para o conforto acústico e vibracional. A escolha da escala foi baseada entre outros fatores para retirar o avaliador da zona de conforto frequentemente existente em escalas mais usuais como de 1 a 10. Além das notas, ao final de cada trecho do circuito foi perguntado se havia algum tipo de ruído ou vibração que havia lhe causado algum incômodo. Essa etapa foi realizada no decorrer da própria avaliação, com o veículo em movimento em uma região de transição entre os trechos avaliados.
- Avaliação final do veículo: De maneira similar a avaliação do percurso, os avaliadores atribuíram notas finais para os veículos, após concluir todo o circuito e estacionar. Não foi aplicada nenhuma questão aberta nesta parte do questionário.
- Avaliação final da pesquisa: Ainda no ponto de apoio, após o término da avaliação do último veículo, os entrevistados foram solicitados a classificá-los de 1 (melhor) a 5 (pior) com relação ao conforto acústico e vibracional. Por último deveria ser indicado qual veículo o entrevistado compraria e qual não compraria se todos tivessem as mesmas condições de preço e pagamento.

5.2.2 Condições de ensaio

Os ensaios foram realizados em três condições denominadas por:

- Avaliação no circuito
- Avaliação em pistas padronizadas
- Avaliação em câmara acústica

Apesar dos ensaios terem sido realizados nas três condições citadas, julgou-se importante priorizar um universo menor para o desenvolvimento do trabalho. Dessa forma, toda a metodologia para criação de um índice de conforto foi baseada nos dados obtidos durante a avaliação no circuito (único trecho no qual houve coleta de dados objetivos e subjetivos). As demais avaliações serão mencionadas nesse trabalho apenas para algumas considerações complementares, devido a sua extensão e as características dos dados coletados (apenas objetivos).



FIGURA 5.15 – Foto do circuito – Calçamento

O trecho de estrada foi avaliado entre os municípios de Nova Lima e Belo Horizonte com aproximadamente 20 km, sob rodovia na qual é possível desenvolver velocidades de até 110 km/h (FIG. 5.16). Esse trecho é composto por um percurso de ida e volta, no qual respectivamente o relevo é de descida e subida, submetendo o veículo a condições de uso diferenciadas. Espera-se que nesse trajeto ruídos aerodinâmicos, de rodagem, e do motopropulsor sejam destacados durante a avaliação.



FIGURA 5.16 – Trajeto e foto do circuito – Estrada

FONTE: Google Maps: <http://maps.google.com.br/>

O trecho urbano foi avaliado no município de Belo Horizonte com um trajeto de aproximadamente 3,5 km (FIG. 5.17). Durante o percurso o veículo foi submetido a diferentes condições de uso: aclives acentuados, reduções em “lombadas” e acesso a ruas, marcha lenta em semáforos. A avaliação nesse circuito deve propiciar dentre outros, a percepção de ruído do motopropulsor, de sistemas acessórios como câmbio, arrefecimento, bem como vibração em condição de marcha de lenta.

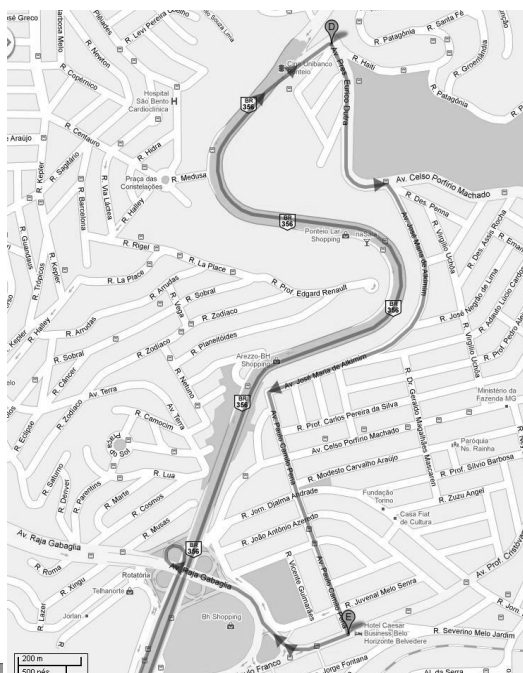
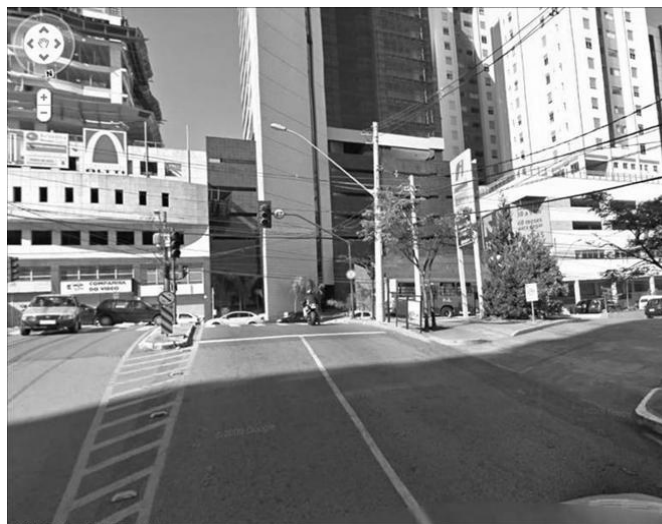


FIGURA 5.17 – Trajeto e foto do circuito – Urbano

FONTE: Google Maps: <http://maps.google.com.br/>

5.2.2.2 Avaliação em pistas padronizadas

A avaliação em pistas padronizadas refere-se a vias nas quais são possíveis submeter os veículos a testes padronizados, como acelerações rápidas e lentas em determinadas marcha, desacelerações, etc., sendo a maioria dessas condições descritas na NORMA FIAT 7R-3000, 2004.

Pretende-se com esse tipo de avaliação, verificar se a metodologia a ser desenvolvida para correlação entre dados objetivos e subjetivos para o circuito pode ser aplicada também para

esses tipos de testes. Ou seja, busca-se verificar a existência de condições padronizadas que refletem a percepção subjetiva dos avaliadores. Tal resultado pode ser trabalhado como um indicador de possíveis simplificações e/ou reduções da tipologia de condições avaliadas.

Para esse trabalho foram utilizadas pistas com asfalto liso e áspero nas quais foram realizados os seguintes testes conforme descrito abaixo:

Ensaio realizado em asfalto liso:

- Aceleração lenta em 2ª, 3ª, 4ª e 5ª marcha
- Aceleração veloz em 2ª, 3ª, 4ª e 5ª marcha
- Desaceleração lenta em 2ª e 3ª marcha
- Desaceleração veloz em 2ª e 3ª marcha
- Marcha lenta com motor frio e com motor a quente
- 2ª marcha com rotação constante em 2000, 3000, 4000 e 5000 rpm
- 3ª marcha com rotação constante em 2000, 3000, 4000 e 5000 rpm
- 5ª marcha com velocidade constante em 50, 70, 90, 110 e 130 km/h
- Desaceleração com motor desligado a partir de 130 km/h

Ensaio realizado em asfalto áspero:

- 2ª marcha com rotação constante em 2000, 3000, 4000 e 5000 rpm
- 3ª marcha com rotação constante em 2000, 3000, 4000 e 5000 rpm
- 5ª marcha com velocidade constante em 50, 70, 90, 110 km/h
- Desaceleração com motor desligado a partir de 110 km/h

5.3.2.3 Avaliação em câmara acústica

A avaliação em câmara acústica apresenta como principal vantagem a minimização de variações nas provas tais como ruídos aleatórios, condições de temperatura e vento, etc., favorecendo principalmente a comparação entre veículos sob diversos parâmetros. Entretanto, seus resultados são bastante limitados no que se refere a real percepção de conforto acústico e vibracional uma vez que não temos a presença do ruído de rodagem do eixo traseiro, bem como o efeito do ruído aerodinâmico. Para esse trabalho realizados os seguintes testes conforme descrito a seguir:

- Aceleração lenta em 2ª, 3ª, 4ª e 5ª marcha
- Aceleração veloz em 2ª, 3ª, 4ª e 5ª marcha
- Desaceleração lenta em 2ª e 3ª marcha
- Desaceleração veloz em 2ª e 3ª marcha
- 2ª marcha com rotação constante em 2000, 3000, 4000 e 5000 rpm
- 3ª marcha com rotação constante em 2000, 3000, 4000 e 5000 rpm
- Desaceleração com motor desligado a partir de 120 km/h com eixo traseiro fixo
- Desaceleração com motor desligado a partir de 120 km/h com eixo dianteiro fixo
- Velocidade constante em 20, 30, 40 e 50 km/h com eixo traseiro fixo e obstáculo
- Velocidade constante em 20, 30, 40 e 50 km/h com eixo dianteiro fixo e obstáculo

5.3 - Metodologia de avaliação

O tratamento dos dados foi dividido basicamente em três etapas: análise dos dados objetivos, análise dos dados subjetivos, estudo e aplicação de um método para correlacionar esses dois grupos de dados, buscando a criação de um índice de conforto.

5.3.1 – Dados objetivos

5.3.1.1 – Análise acústica

Para análise acústica dos dados coletados no circuito de avaliação foi utilizado o software Artemis da Head Acoustics HmgB (FIG. 5.18). Os dados foram organizados para cada um dos três trechos avaliados e adotou-se como caracterização objetiva de todo o circuito (denominada como global) as médias obtidas em cada trecho. Para que eventuais interferências durante a coleta de dados fossem minimizadas, todo o circuito foi ouvido (via gravação da “cabeça” artificial) e visualizado simultaneamente, sendo o arquivo de medição fragmentado em diversas frações isentas de eventos aleatórios (passagem de outros veículos, buracos e ou deformações na pista, etc.). O resultado final para cada trecho foi a média logarítmica ou aritmética dos valores obtidos para e todas as frações.

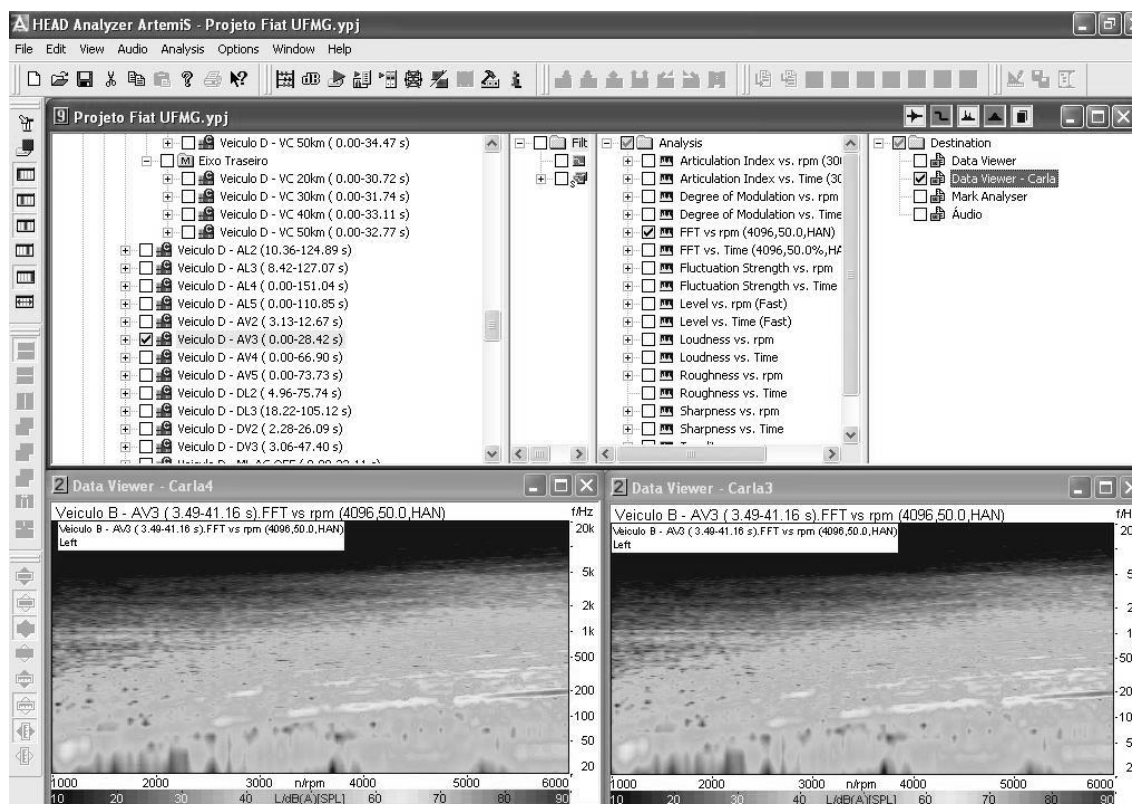


FIGURA 5.18 – Software de análise e cálculo de parâmetros acústicos

Foram obtidos os valores de pressão sonora em dB(A) e calculados (pelo “software” de análise) os parâmetros “loudness”, “roughness”, “sharpness”, “fluctuation strength”, curtose e índice de articulação (TAB. 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5). Exceto pelo parâmetro curtose, todos os demais foram escolhidos pela sua vasta aplicabilidade no âmbito automobilístico (BRIZON e MEDEIROS, 2010). Já o parâmetro curtose foi definido por motivos opostos, uma vez que a bibliografia sobre a sua utilização é limitada. A adoção desse variável no decorrer desse trabalho corrobora com o cunho investigativo a respeito da sua importância e empregabilidade na caracterização acústica e vibracional.

Para os cálculos citados o software baseia-se na formulação já descrita na revisão bibliográfica desse trabalho contempladas nos subitens 3.4.1 a 3.4.5.

TABELA 5.2 – Parâmetros acústicos medidos e calculados - calçamento

CALÇAMENTO							
Veículo	Nível de ruído dB(A)	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (acum)	Fluctuation Strength	Kurtosis	Índice de Articulação (%)
A	75,3	38,25	1,93	1,11	0,01825	2,575	64,6
B	77,6	43,4	2,065	1,17	0,02105	2,53	58,8
C	76,75	38,85	1,865	1,085	0,01705	2,72	67,7
D	76,55	37,2	1,855	1,135	0,02155	2,79	65,8
E	76,95	44,2	2,035	1,235	0,0228	2,51	59,1

TABELA 5.3 – Parâmetros acústicos medidos e calculados - estrada

ESTRADA							
Veículo	Nível de ruído dB(A)	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (acum)	Fluctuation Strength	Kurtosis	Índice de Articulação (%)
A	70,63	27,11	1,93	1,25	0,0233	2,67	60,27
B	70,37	25,23	1,74	1,08	0,0251	2,62	66,8
C	70,16	25,54	1,9	1,16	0,0217	2,71	66,94
D	72,01	26,93	1,92	1,17	0,0242	2,83	65,37
E	71,76	28,91	2,03	1,23	0,0278	2,44	60,88

TABELA 5.4 – Parâmetros acústicos medidos e calculados - urbano

URBANO							
Veículo	Nível de ruído dB(A)	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (acum)	Fluctuation Strength	Kurtosis	Índice de Articulação (%)
A	66,43	18,88	1,1	1,05	0,0277	2,55	84,01
B	64,34	16,37	0,89	0,95	0,0148	2,67	88,77
C	63,51	16,25	0,97	1	0,0213	2,65	88,6
D	65,64	16,56	1,06	0,98	0,0153	2,71	86,08
E	65,49	18,6	1,08	1,06	0,0172	2,53	84,54

TABELA 5.5 – Parâmetros acústicos medidos e calculados - circuito global (média)

GLOBAL							
Veículo	Nível de ruído dB(A)	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (acum)	Fluctuation Strength	Kurtosis	Índice de Articulação (%)
A	72,20	28,08	1,65	1,14	0,0231	2,5983	69,63
B	73,75	28,33	1,57	1,07	0,0203	2,6067	71,46
C	73,01	26,88	1,58	1,08	0,0200	2,6933	74,41
D	73,34	26,90	1,61	1,10	0,0204	2,7767	72,42
E	73,56	30,57	1,72	1,18	0,0226	2,4933	68,17

5.3.1.2 – Análise vibracional

Para análise dos dados vibracionais foi utilizado o software Test.Lab (REV10B) da LMS Engineering Innovation (FIG. 5.19). De maneira análoga aos dados de ruído o arquivo de medição foi fragmentado em diversas frações em função do tipo de trecho e eventuais interferências no sinal.

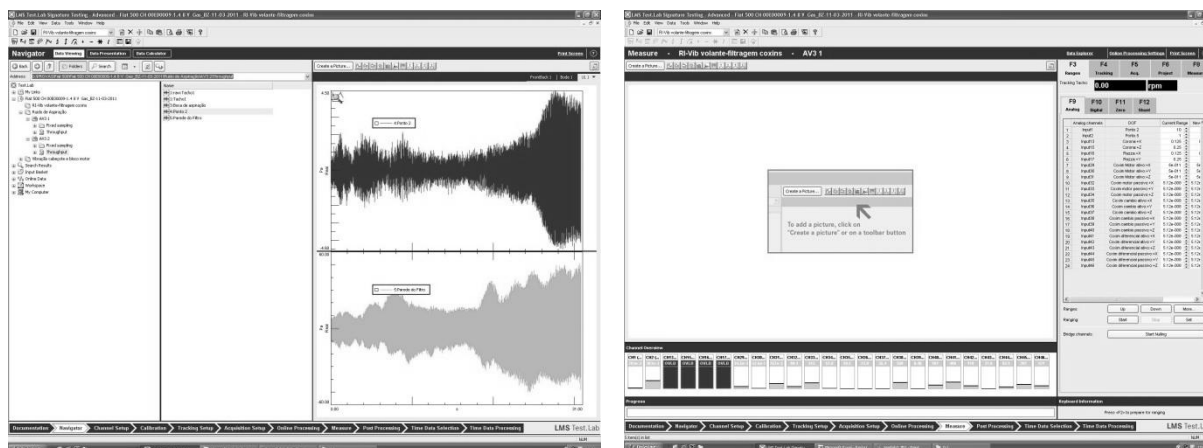


FIGURA 5.19 – Software de análise e cálculo de parâmetros vibracionais

Após a fragmentação da medição, os sinais de vibração em m/s^2 foram traçados em função do tempo e calculados seus respectivos valores de RMS (Root Mean Squared) (FIG. 5.20). O valor final de RMS para cada trecho foi obtido através da média aritmética entre todos os intervalos pertinentes. Para as medições no volante e alavanca de câmbio nos quais o sinal foi coletado nas três direções x, y, e z foi considerado o valor referente a direção que apresentou maior magnitude. Os resultados são apresentados na TAB. 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9.

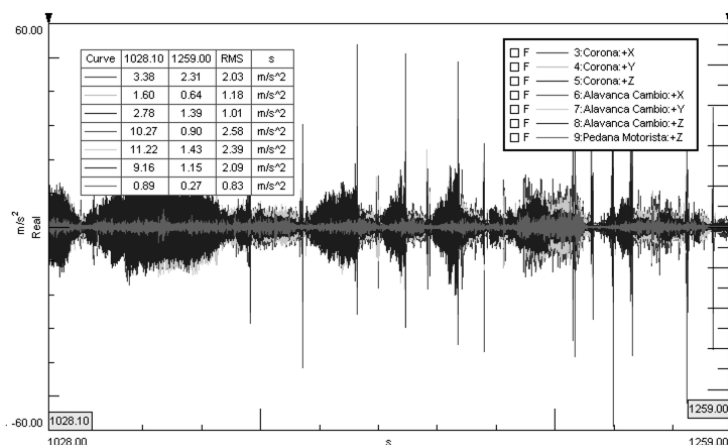


FIGURA 5.20 – Cálculo dos valores de RMS

TABELA 5.6 – Parâmetros vibracionais calculados - calçamento

CALÇAMENTO			
Veiculo	RMS Corona (m/s ²)	RMS Alavanca de câmbio (m/s ²)	RMS Pedana (m/s ²)
A	9,08	4,69	2,12
B	11,11	2,68	2,06
C	5,34	5,92	2,02
D	5,74	5,59	1,71
E	9,44	6,33	2,78

TABELA 5.7 – Parâmetros vibracionais calculados - estrada

ESTRADA			
Veiculo	RMS Corona (m/s ²)	RMS Alavanca de câmbio (m/s ²)	RMS Pedana (m/s ²)
A	2,64	3,28	1,28
B	3,24	1,95	1,16
C	1,83	3,00	1,41
D	2,44	5,43	0,89
E	3,01	8,09	4,51

TABELA 5.8 – Parâmetros vibracionais calculados - urbano

URBANO			
Veiculo	RMS Corona (m/s ²)	RMS Alavanca de câmbio (m/s ²)	RMS Pedana (m/s ²)
A	1,71	2,32	0,68
B	1,83	1,56	0,64
C	1,09	2,18	0,61
D	0,94	3,22	0,44
E	1,66	5,21	0,82

TABELA 5.9 – Parâmetros vibracionais calculados – circuito global (médias)

GLOBAL			
Veículo	RMS Corona (m/s ²)	RMS Alavanca de câmbio (m/s ²)	RMS Pedana (m/s ²)
A	4,02	3,39	1,34
B	4,86	1,89	1,26
C	2,52	3,50	1,36
D	3,07	4,92	0,98
E	4,28	8,08	3,15

5.3.2 – Dados subjetivos

Os dados do questionário referentes às seções de seleção e perfil foram trabalhados de forma descritiva a fim de caracterizar a amostra de avaliadores e avaliar possíveis influências de alguns parâmetros nos resultados. Verificou-se que para a maioria das características levantadas de forma geral a amostra se mostrou relativamente homogeneia.

Para verificar a existência de diferenças entre as avaliações do público técnico e especialista foi realizado um teste t de variância agrupada para diferença entre duas médias aritméticas, o qual presume, dentre outros fatores, que a variância e os desvios-padrão das duas populações não são conhecidos e que as únicas informações disponíveis são relativas à própria amostra. O procedimento do teste é apresentado através da EQ. (5.1) e (5.2):

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{s_p^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (5.1)$$

$$s_p^2 = \frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)} \quad (5.2)$$

Nas quais:

s_p^2 : é a variância agrupada

$\bar{x}_1$: é a média da amostra extraída da população 1

s_1^2 : é variância da amostra extraída da população 1

n_1 : é o tamanho da amostra extraída da população 1

$\overline{x_2}$: é a média da amostra extraída da população 2

s_2^2 : é variância da amostra extraída da população 2

n_2 : é o tamanho da amostra extraída da população 2

μ_1 : é a média aritmética da população 1

μ_2 : é a média aritmética da população 2

A estatística do teste t segue uma distribuição t, com n_1+n_2-2 graus de liberdade. A hipótese nula do teste (H_0) é de que não existem diferenças entre as médias aritméticas das duas populações, contra a hipótese alternativa (H_1) de que as médias não são iguais, EQ. (5.3) e (5.4).

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \quad \text{ou} \quad \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (5.3)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \quad \text{ou} \quad \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \quad (5.4)$$

Aplicado o procedimento para todos os 40 grupos de notas – oito avaliações (acústica e vibracional) por veículo – foi verificado no nível de significância de 0,05 que a hipótese nula (H_0) deve ser aceita, ou seja, não há diferenças entre as médias de notas entre os dois tipos de público. Embora, seja comum em estudos dessa natureza, admitir níveis de significância superiores a 0,05, esse valor foi adotado pela sua vasta aplicabilidade, de forma geral, na disciplina de estatística.

As notas atribuídas para conforto acústico dos veículos nas condições de calçamento, estrada, urbano e global foram tabuladas e reduzidas respectivamente a quatro valores de média aritmética para cada veículo (TAB. 5.10). A média foi escolhida, em detrimento a outras medidas descritivas como mediana, moda, etc., pela própria característica do conjunto de dados (uniformidade, ausência de valores discrepantes ou extremos, etc.), bem como pela sua usual empregabilidade em estudos correlatos. Esses valores serão correlacionados com os parâmetros acústicos previamente medidos e calculados para caracterização do conforto acústico. As tabelas dos dados originais podem ser consultadas no anexo A. Procedimento análogo foi realizado para as notas de conforto vibracional.

TABELA 5.10 – Média aritmética calculada para as notas atribuídas pelos 33 avaliadores

NOTA SUBJETIVA DA AVALIAÇÃO DOS VEÍCULOS A, B, C, D e E				
Amostra (n)	Calçamento	Estrada	Urbano	Final
1	x_1	y_1	z_1	u_1
2	x_2	y_2	z_2	u_2
3	x_3	y_3	z_3	u_3
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
n_i	x_i	y_i	z_i	u_i
Média	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$	$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}$	$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n}$

Questões abertas nas quais os avaliadores puderam indicar os principais incômodos do ponto de vista acústico e vibracional também foram analisadas através de uma distribuição de frequências.

Ao término da avaliação dos 5 veículos foi solicitado que os avaliadores classificassem os veículos de acordo com o conforto acústico e vibracional, nessa ocasião foi possível observar uma pequena diferença entre a avaliação qualitativa (do melhor para o pior) e avaliação quantitativa (atribuição de notas). Por último, os avaliadores tiveram que indicar qual veículo seria ou não comprado se todos tivessem as mesmas condições de pagamento e preço. Esses resultados descritivos e os demais são apresentados no próximo capítulo.

5.3.3 – Determinação de índices de conforto

Foi utilizado o PHStat2 que é um suplemento estatístico da Prentice Hall Inc., para o Microsoft Excel para Windows. A versão utilizada foi a 2.1.0.

Para determinação de um índice de conforto espera-se aplicar métodos estatísticos que correlacionem dados subjetivos e objetivos. Entretanto, antes de utilizar qualquer um desses métodos faz-se necessária a aplicação de um teste de aderência a curva normal, uma vez que a maioria dos recursos estatísticos está vinculada a esta condição.

Um dos testes utilizados e aplicados nesse trabalho é o de Kolmogorov-Smirnov (KS) que compara uma distribuição cumulativa observada (DO) com uma distribuição teórica normal (DN) (TAB. 5.11). A linha “absoluta” indica a diferença entre a DO e a DN. Valores elevados na significância ($>0,05$) indicam que a DO corresponde à uma DN. Como podem ser observadas na última linha da TAB. 5.11 as variáveis apresentaram significância maior que 0,5, ou seja, as medidas têm distribuição normal.

TABELA 5.11 – Teste de aderência a curva normal de Kolmogorov-Smirnov

Estatísticas		Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (asper)	Fluctuation Strength (vacil)	Kurtosis	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído (dBA)	Média
Tamanho da amostra (N)		15	15	15	15	15	15	15	15
Parâmetros Normais ^{a,b}	Média	28,152	1,6247	1,111	0,0212733	2,63367	71,217	70,899	4,1111
	Desvio padrão	9,99605	0,45192	0,09341	0,00409712	0,11017	11,5187	4,9601	0,47344
Maiores diferenças	Absoluta	0,157	0,295	0,1	0,145	0,11	0,287	0,15	0,155
	Positiva	0,157	0,211	0,083	0,107	0,11	0,287	0,15	0,155
	Negativa	-0,151	-0,295	-0,1	-0,145	-0,096	-0,2	-0,146	-0,119
Kolmogorov-Smirnov Z		0,606	1,142	0,388	0,561	0,424	1,11	0,579	0,6
Significância		0,856	0,147	0,998	0,911	0,994	0,17	0,891	0,865

a. Teste de distribuição é normal

b. Calculados dos dados

Outro método de estudo da aderência à DN é a análise dos índices de assimetria (“skewness”) e de curtose (curtose) de uma distribuição, uma vez que a principal característica de uma distribuição normal é a sua simetria. Na TAB. 5.12 observa-se nas colunas em destaque que os valores de “skewness” e curtose encontrados para todas as variáveis são menores que 1,00 (índices maiores que 1 indicam distribuição fortemente assimétrica), sendo que na maioria, o índice é menor que 0,15, indicando curva fortemente simétrica (normal). Apenas as variáveis “loudness”, índice de articulação e nota têm valores entre 0,15 e 1, indicando curvas moderadamente simétricas. Por esse método pode-se considerar também que a distribuição dos dados se aproxima de uma DN.

TABELA 5.12 – Cálculo dos índices de assimetria e curtose - aderência à DN

Estatística Descritiva - Índices de Assimetria									
Parâmetro	N (amostra)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Skewness		Kurtosis	
	Estatística	Estatística	Estatística	Estatística	Estatística	Estatística	Erro padrão	Estatística	Erro padrão
Loudness (sone)	15	16,25	44,2	28,152	9,99605	0,337	0,58	-1,306	1,121
Roughness (asper)	15	0,89	2,07	1,6247	0,45192	-0,724	0,58	-1,476	1,121
Sharpness (asper)	15	0,95	1,25	1,111	0,09341	-0,139	0,58	-0,91	1,121
Fluctuation Strength (vacil)	15	0,0148	0,0278	0,0212733	0,00409712	-0,022	0,58	-0,83	1,121
Kurtosis	15	2,44	2,83	2,63367	0,11017	0,052	0,58	-0,679	1,121
Índice de Articulação (%)	15	58,8	88,8	71,217	11,5187	0,617	0,58	-1,464	1,121
Nível de ruído dB(A)	15	63,5	77,6	70,899	4,9601	-0,06	0,58	-1,449	1,121
Nota	15	3,42	4,85	4,1111	0,47344	0,248	0,58	-1,096	1,121
Tamanho da amostra	15								

Por último aplicou-se o teste de normalidade de Shapiro-wilk, indicado para amostras inferiores a 30 unidades (TAB. 5.13). Como resultado, verificou-se que as variáveis “roughness” e índice de articulação apresentam valores de significância menores que 0,05 indicando uma não aderência à DN para estas duas variáveis. Conclui-se que mesmo sendo estabelecida a normalidade para a maioria das variáveis esta definição deve ser avaliada criteriosamente devido ao baixo número amostral.

TABELA 5.13 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk

Teste de Normalidade			
Parâmetros	Shapiro-Wilk		
	Estatística	N	Significância
Loudness (sone)	0,899	15	0,091
Roughness (asper)	0,775	15	0,002
Sharpness (asper)	0,962	15	0,727
Fluctuation Strength (vacil)	0,954	15	0,589
Kurtosis	0,974	15	0,914
Índice de Articulação (%)	0,817	15	0,006
Nível de ruído (dBA)	0,91	15	0,137
Nota	0,935	15	0,323

Verificada a normalidade das variáveis, o próximo passo foi estudar uma função que relacionasse as notas com os parâmetros medidos / calculados. Para isso optou inicialmente por uma avaliação individual de cada parâmetro com a nota, buscando um melhor tipo de

regressão. Esse procedimento foi adotado para os 7 parâmetros objetivos em estudo. No GRA. 5.1 e TAB. 5.14 os resultados podem ser visualizados para o parâmetro “roughness”.

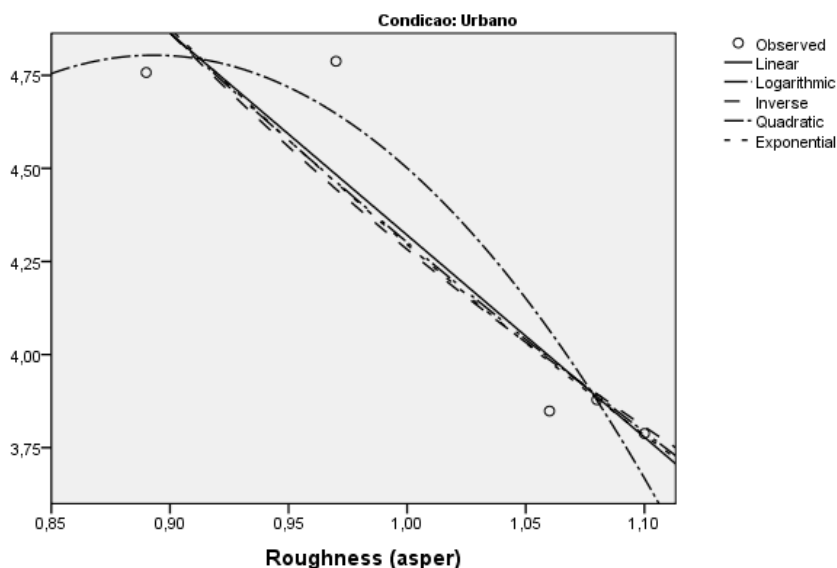


GRÁFICO 5.1 – Modelos de regressão para o parâmetro “roughness” x nota

TABELA 5.14 – Regressões obtidas para as variáveis “roughness” x nota

Tipo regressao	Variável	R2	Beta	Significância	Constante
Linear	Roughness (asper)	0,867	(5,425)	0,021	9,746
Logarithmic	ln(Roughness (asper))	0,855	(5,343)	0,025	4,301
Inverse	1 / Roughness (asper)	0,841	5,236	0,028	(0,954)
Quadratic	Roughness (asper)	0,921	47,410	0,404	(26,542)
Exponential	Roughness (asper)	0,869	(1,267)	0,021	15,254

Analisando as 7 variáveis em questão, observou-se que o modelo linear e exponencial foram os que mais se adequaram com coeficientes de determinação próximos a 0,87 e com significâncias em torno de 0,02 para o parâmetro “roughness”. Entretanto, de forma geral não houve um único modelo adequado para representar todos os parâmetros em estudo, optando assim pelo modelo linear na análise de regressão múltipla devido a sua aplicabilidade e para simplificação dos cálculos.

Na expectativa de que uma única medida ou métrica não seja suficiente para descrever o conforto acústico percebido foi escolhido o modelo de regressão múltipla para prever o valor da nota subjetiva em função de diversas variáveis explanatórias.

Segundo LEVINE et al. (2005), quando diversas variáveis explanatórias encontram-se presentes, o modelo de regressão linear simples, pode ser estendido assumindo uma relação linear entre cada variável explanatória e a variável dependente. Dessa forma, o modelo de regressão múltipla, com k variáveis explanatórias é definido na EQ. (5.5) abaixo:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + b_3 X_{3i} + \dots + b_k X_{ki} + \varepsilon_i \quad (5.5)$$

Na qual:

b_0 = interseção de Y

b_1 = interseção de Y em relação à X_1 , mantendo constantes as variáveis $X_2, X_3, \dots, X_k$

b_2 = interseção de Y em relação à X_2 , mantendo constantes as variáveis $X_1, X_3, \dots, X_k$

·

·

b_k = interseção de Y em relação à X_k , mantendo constantes as variáveis $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{k-1}$

ε_i = erro aleatório em Y, para observação i

No QUADRO 5.1 é apresentada a relação de variáveis explanatórias e a variável dependente considerada nesse estudo para determinação de um índice de conforto acústico.

QUADRO 5.1 – Variáveis do modelo de regressão múltipla para conforto acústico

Variável	Descrição
Y	Nota
X_1	Loudness
X_2	Roughness
X_3	Sharpness
X_4	Fluctuation strength
X_5	Kurtosis
X_6	Índice de articulação
X_7	Nível de ruído

Da mesma forma que no caso da regressão linear simples, os coeficientes de regressão múltipla $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ podem ser obtidos utilizando o método dos mínimos quadrados conforme EQ. (5.6) e (5.7) apresentadas já em suas formas resolvidas.

$$b_1 = \frac{SQXY}{SQX} \quad (5.6)$$

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (5.7)$$

Nas quais:

SQ = soma dos quadrados

$$SQXY = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n}$$

$$SQX = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Para solução das EQ. (5.6) e (5.7) cinco valores precisam ser calculados. Estes correspondem

a:

n, o tamanho da amostra;

$\sum_{i=1}^n X_i$, a soma dos valores de X;

$\sum_{i=1}^n Y_i$, a soma dos valores de Y;

$\sum_{i=1}^n X_i^2$, a soma dos valores de X ao quadrado;

e $\sum_{i=1}^n X_i Y_i$, a soma dos produtos da multiplicação dos valores de X e Y.

Entretanto, o desenvolvimento desses cálculos para o modelo de regressão múltipla é muito mais complexo, sendo adotado então o uso PHStat e do Microsoft Excel para obtenção dos resultados.

Assim como no modelo de regressão simples, é calculado o coeficiente de determinação. Na regressão múltipla, uma vez que existem pelo menos duas variáveis explanatórias, o coeficiente de determinação múltipla representa a proporção da variação de Y que é explicada através do conjunto de variáveis explanatórias selecionadas. Para um modelo de duas variáveis explanatórias, o coeficiente de determinação múltipla $R^2_{y \cdot 12}$ é definido de acordo com a EQ. (5.8):

$$r^2_{y \cdot 12} = \frac{SQ\text{ Reg}}{STQ} \quad (5.8)$$

Na qual:

SQReg = soma dos quadrados devido a regressão

STQ = soma total dos quadrados

Alguns estatísticos sugerem que para modelos de regressão múltipla seja calculado um R^2 ajustado para refletir tanto o número de variáveis explanatórias do modelo quando o tamanho da amostra. Isto é especialmente necessário quando se compara dois ou mais modelos de regressão que realizam a previsão da mesma variável dependente, possuindo, porém, diferentes números de variáveis explanatórias ou de previsão (LEVINE et al, 2005). O R^2 ajustado é definido pela EQ. (5.9):

$$R^2_{aj} = 1 - \left[(1 - R^2_{y \cdot 12 \dots k}) \frac{n-1}{n-k-1} \right] \quad (5.9)$$

Na qual k é o número de variáveis explanatórias na equação da regressão.

Também foi aplicado o método que utiliza o fator inflacionário da variância (FIV) para medir a colinearidade para cada variável explanatória. A existência de colinearidade entre as variáveis explanatórias é um problema importante na aplicação da análise de regressão

múltipla LEVINE et al. (2005). Essa condição acontece quando algumas variáveis explanatórias são fortemente correlacionadas entre si. Nesse tipo de situação, variáveis colineares não fornecem novas informações, tornando difícil separar o efeito dessas variáveis sobre a variável dependente ou variável de resposta. Nestes casos, os valores dos coeficientes de regressão para as variáveis correlacionadas podem flutuar drasticamente, dependendo de quais variáveis independentes sejam incluídas no modelo.

O FIV_j , fator inflacionário da variância para a variável j , é definido pela EQ. (5.10):

$$FIV_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (5.10)$$

Na qual:

R_j^2 : é o coeficiente de determinação múltipla para a variável explanatória X_j com todas as outras variáveis X .

Se um conjunto de variáveis explanatórias não for correlacionado, então FIV_j é igual a 1. Se o conjunto for fortemente intercorrelacionado, então FIV_j pode até exceder a 10. MARQUARDT apud LEVINE et al. (2005) sugere que, se FIV_j for maior que 10, existe demasiada correlação entre as variável X_j e as outras variáveis explanatórias. No entanto, outros estatísticos como SNEE apud LEVINE et al. (2005) sugerem um critério mais conservador, não utilizando a regressão dos mínimos quadrados quando o FIV_j máximo exceder a 5. Para efeito desse trabalho optou-se pelo critério mais conservador e modelos que apresentaram variáveis com FIV_j maior que 5 não foram descartados.

Ainda para a definição dos modelos foi realizada uma análise de resíduos para verificação ou não da adequação do modelo de regressão linear múltipla.

Para a construção final dos modelos de regressão múltipla buscou-se utilizar o critério da parcimônia, ou seja, desenvolver um modelo de regressão que incluísse o menor número de variáveis explanatórias, de forma a permitir uma interpretação adequada da variável dependente de interesse. Modelos de regressão com um menor número de variáveis explanatórias são inerentemente mais fáceis de serem interpretados, particularmente porque são menos vulneráveis à colinearidade. Modelos com muitas variáveis explanatórias requerem

certa complexidade na seleção do modelo apropriado, além de um volume de cálculos consideráveis. Ao se trabalhar com modelos extensos deve-se considerar também que embora modelos concorrentes possam ser quantitativamente avaliados, pode não existir um modelo exclusivamente melhor, mas ao contrário, vários modelos igualmente apropriados.

Na construção dos modelos deste trabalho foi utilizada a abordagem dos melhores subconjuntos que avalia todos os modelos de regressão possíveis para um determinado conjunto de variáveis independentes, ou os melhores subconjuntos de modelos para um determinado número de variáveis independentes.

Nessa abordagem um critério que é normalmente utilizado corresponde ao R^2 ajustado, que ajusta o R^2 de cada modelo para corresponder ao número de variáveis no modelo, bem como ao tamanho da amostra. Um segundo critério, geralmente utilizado na avaliação de modelos concorrentes, é baseado na estatística desenvolvida por NETER et al. apud LEVINE et al. (2005). A estatística C_p definida pela EQ. (5.11) mede as diferenças entre um modelo de regressão ajustado e um modelo real.

$$C_p = \frac{(1 - R_k^2)(n - T)}{1 - R_T^2} - (n - 2(k + 1)) \quad (5.11)$$

Na qual:

k: número de variáveis independentes em um modelo de regressão

T: número total de parâmetros (incluindo a interseção) a serem estimados no modelo de regressão completo

R_k^2 : coeficiente de determinação múltipla para um modelo de regressão que possua k variáveis independentes

R_T^2 : coeficiente de determinação múltipla para um modelo de regressão completo que contenha todos os parâmetros T estimados.

Quando um modelo de regressão com k variáveis independentes contém somente diferenças aleatórias em relação a um modelo real, o valor médio de C_p é k+1. Por conseguinte, ao avaliar muitos modelos de regressão alternativos, o objetivo é encontrar modelos cuja C_p esteja próximo ou inferior a (k+1).

Dessa forma os modelos de regressão múltipla foram traçados para cada trecho avaliado no circuito considerando toda a metodologia citada: análise de resíduos, exclusão de variáveis colineares, utilização do R^2 ajustado, valor da estatística C_p , bem como a significância encontrada para cada modelo. Como pode ser observado no próximo capítulo, mesmo com todas essas considerações, para determinados trechos avaliados, foi encontrado mais de um modelo para explicação da percepção de conforto.

Dois estudos complementares foram realizados buscando verificar:

- a influência da vibração em diversas partes do veículo na percepção do conforto vibracional
- a influência do ruído na percepção do conforto vibracional

Para esses dois casos, também foram calculados modelos de regressão múltipla. A relação das variáveis explanatórias e da variável dependente consideradas em cada estudo encontra-se disposta respectivamente nos QUADROS 5.2 e 5.3.

QUADRO 5.2 – Variáveis do modelo de regressão para conforto vibracional x vibração de diversos pontos

Variável	Descrição
Y	Nota
X_1	Vibração corona
X_2	Vibração alavanca de câmbio
X_3	Vibração pedana

QUADRO 5.3 – Variáveis do modelo de regressão para conforto vibracional x influência do ruído

Variável	Descrição
Y	Nota
X_1	Nível de ruído
X_2	Kurtosis

Por último, as equações de conforto acústico encontradas para cada trecho avaliado foram aplicadas sobre as medições em condições de pistas padronizadas e em câmara acústica. O objetivo aqui é de verificar a validação do índice de conforto acústico para condições de prova utilizadas classicamente no desenvolvimento de novos projetos, bem como verificar simultaneamente a maneira como esses testes retratam a percepção de conforto do cliente.

5.3.3.1 – Normalização dos coeficientes das equações

A análise de regressão múltipla é uma metodologia de previsão de valores de uma variável de resposta (dependentes) através de um conjunto de variáveis explicativas (independentes). Quando essas variáveis explicativas possuem unidades de medidas diferentes recomenda-se a normalização dos coeficientes para uma interpretação dos resultados mais adequada.

A normalização de cada variável e coeficientes é realizada através das EQ. (5.12, 5.13 e 5.14):

$$y'_i = \frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \quad (5.12)$$

$$x'_{ki} = \frac{x_{ki} - \bar{x}_i}{s_{xi}} \quad (5.13)$$

$$b'_k = b_k \frac{s_{xi}}{s_y} \quad (5.14)$$

Na qual:

y'_i = é a variável y_i normalizada

x'_{ki} = é a variável x_{ki} normalizada

b'_k = é o coeficiente b_k normalizado

s_{xi} = é o desvio padrão da variável x_i

s_y = é o desvio padrão da variável y

Dessa forma entende-se que os coeficientes normalizados das variáveis explicativas causais, são, então, as mudanças esperadas no desvio padrão da variável dependente quando as variáveis explicativas variam de uma unidade de desvio padrão, mantendo as outras variáveis constantes (RIBEIRO, 2000).

As equações que caracterizam um determinado comportamento (índices de conforto acústico ou vibracional) foram apresentadas de duas formas: com os coeficientes normalizados e com os coeficientes sem normalização. Isto foi feito para permitir comparação com resultados de outros autores, tanto os que adotaram um procedimento como aqueles que utilizaram outro.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo contempla a análise de resultados dos dados descritivos obtidos a partir da avaliação subjetiva do público de avaliadores e dos índices de conforto acústico desenvolvidos a partir da correlação entre dados objetivos e subjetivos. Todos os resultados foram obtidos considerando não apenas uma avaliação global, mas o comportamento dos modelos de regressão para cada tipo de trecho avaliado. Como resultados complementares são apresentados índices de conforto vibracional desenvolvidos a partir de medidas vibracionais em pontos de interface condutor / veículo e medidas acústicas, buscando explorar a influência dessas últimas na percepção do conforto vibracional. Por último, os índices de conforto acústico são aplicados em testes padronizados utilizados para avaliação de veículos.

6.1 – Análises descritivas

6.1.1 – Perfil dos avaliadores

No GRA. 6.1 (a até m) são apresentados algumas características descritivas da amostra de avaliadores. De forma geral, verifica-se uma amostra de perfil homogêneo com diversas classes superando a frequência de 50%.

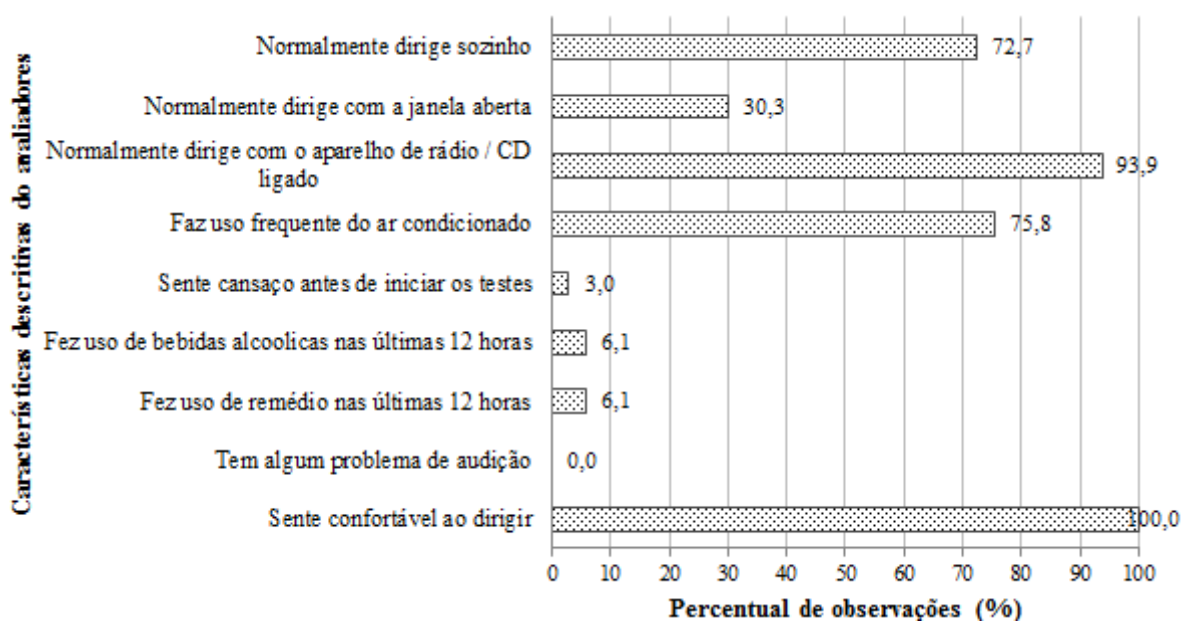


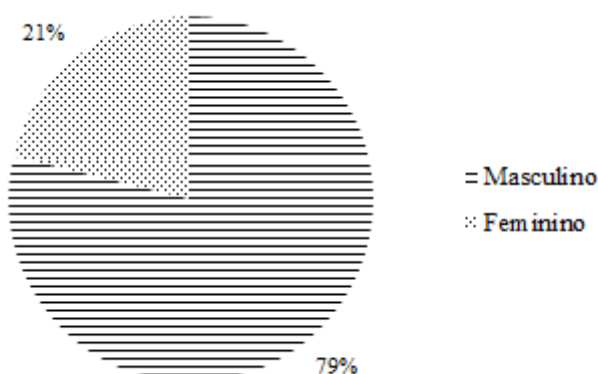
GRÁFICO 6.1 – Características descritivas dos avaliadores
(a) – Hábitos ao conduzir veículos e perfil

Observa-se no GRA. 6.1 (a) e (e) que a grande maioria dos avaliadores estava apta para realização do testes no que se refere a cansaço, conforto ao dirigir, horas de sono na última noite e uso de remédios ou bebidas alcoólicas nas últimas 12 horas. Verifica-se também uma similaridade nas condições de uso dos veículos como uso de ar condicionado (consequentemente com janelas fechadas), uso de aparelho de rádio / CD e sem presença de passageiros.

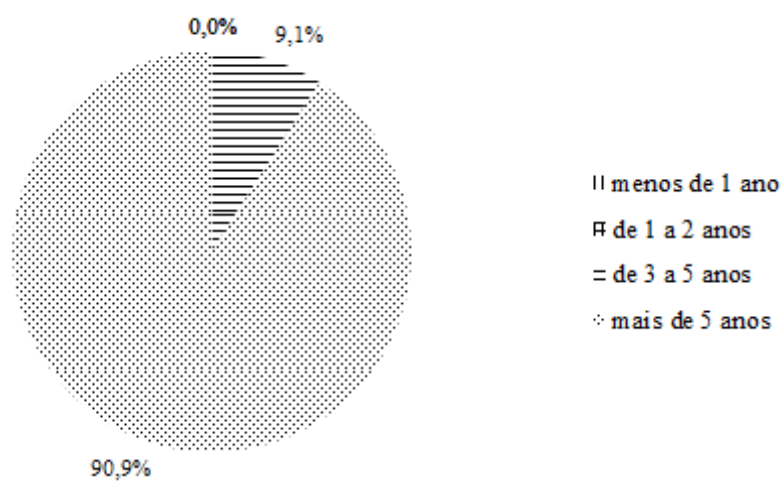
Em torno de 80% da amostra é constituída de público masculino, esse mesmo percentual indica também aqueles que possuem mais de 26 anos (GRA. 6.1 (b) e (d)). Pode-se considerar que são motoristas experiente uma vez que cerca de 90% possuem mais de 5 anos de habilitação (GRA. 6.1 (c)). A maior parte dirige em torno de 2 horas por dia e mais de 5 vezes por semana (GRA. 6.1 (f) e (g)).

Um ponto favorável na caracterização da amostra é que mais 60% possuem veículos no segmento dessa pesquisa ou inferior (acredita-se que proprietários de veículos em segmentos superiores possuem um padrão de conforto superior, ou seja, são mais críticos) (GRA. 6.1 (h)).

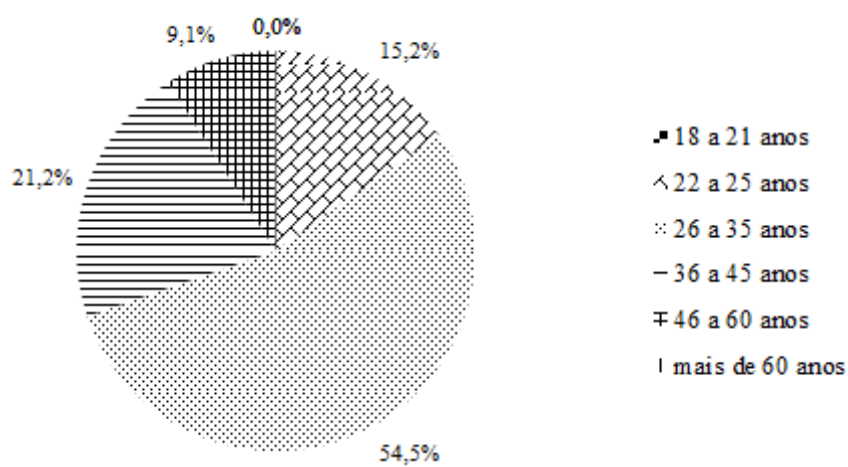
Com relação aos percursos de avaliação mais de 80% dos avaliadores afirmaram dirigir quase sempre ou sempre em trechos urbanos e de estrada. Já em calçamento a frequência passa a ser quase nunca ou às vezes. Embora não esteja contemplado nesse estudo verificou-se que a grande maioria da amostra nunca ou quase nunca dirige em trechos de terra (GRA. 6.1 (i até m)).



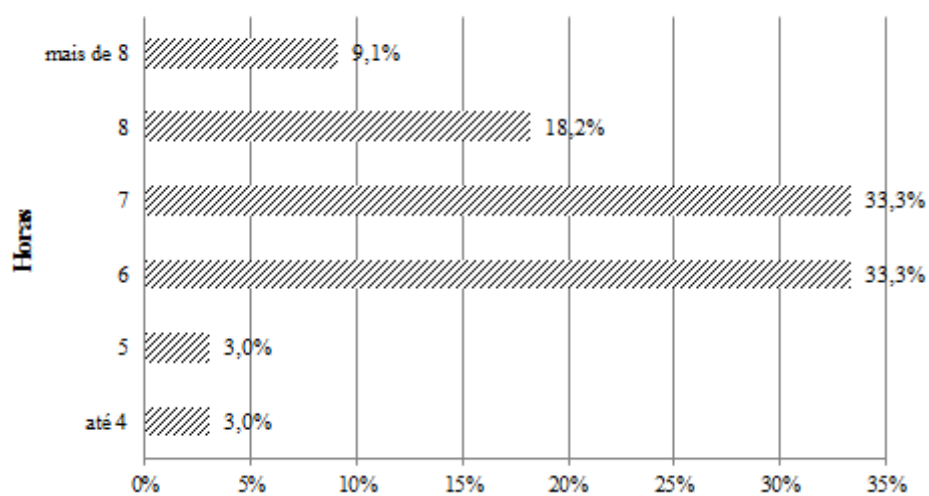
(b) – Gênero



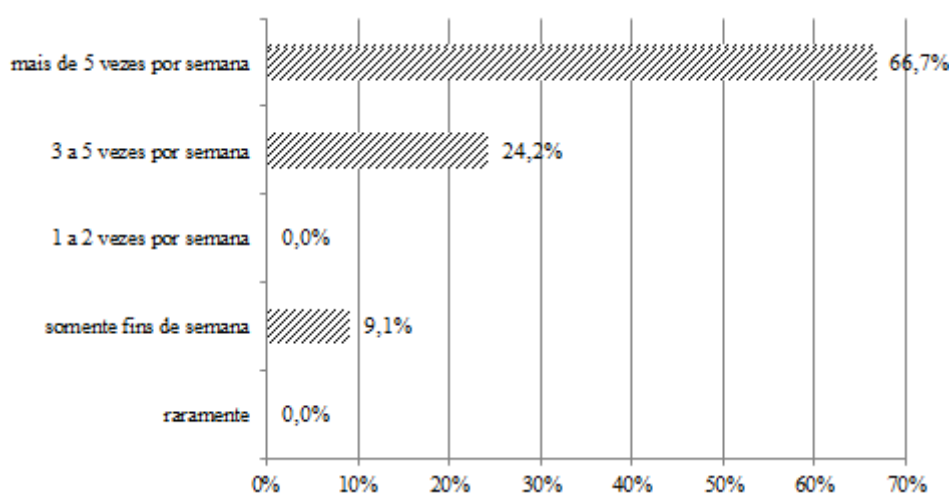
(c) – Tempo de habilitação



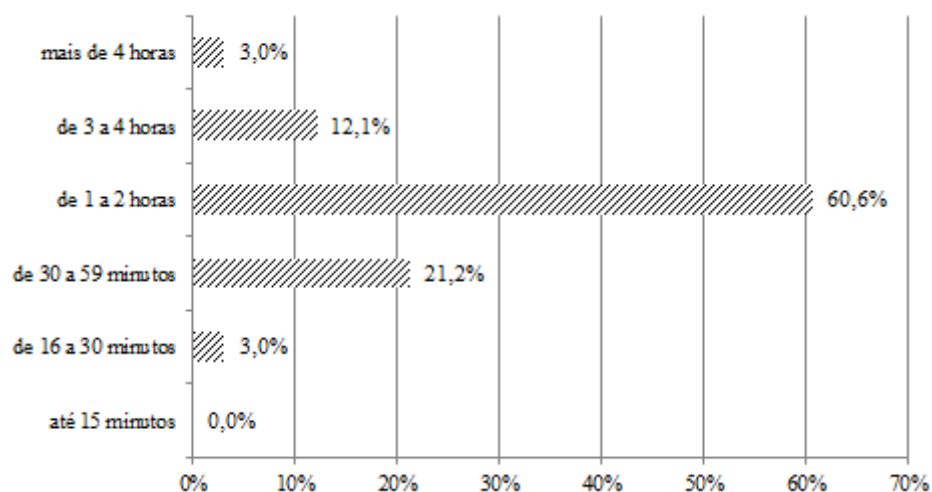
(d) – Idade



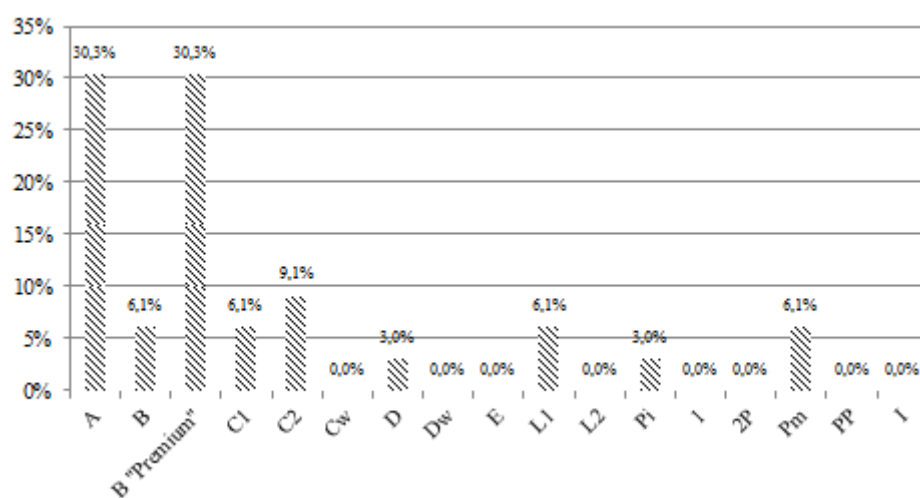
(e) – Horas de sono na noite anterior à avaliação



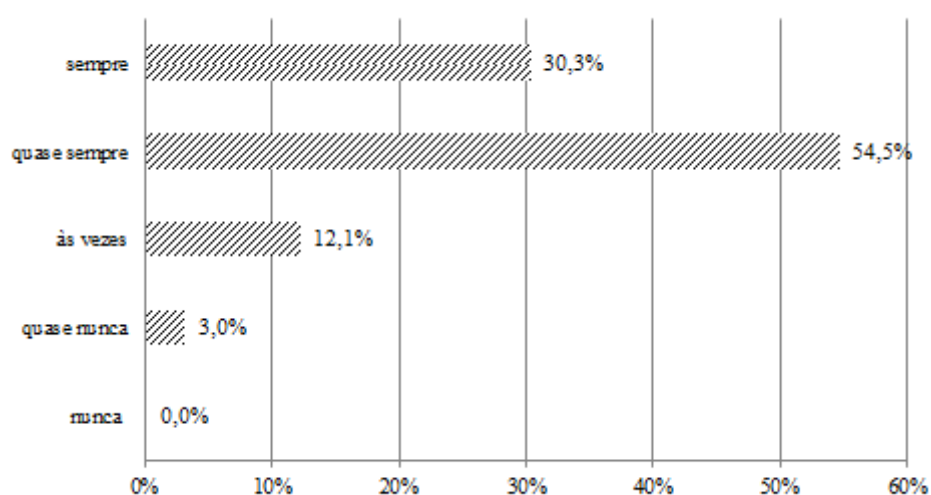
(f) – Frequência semanal com a qual dirige o veículo



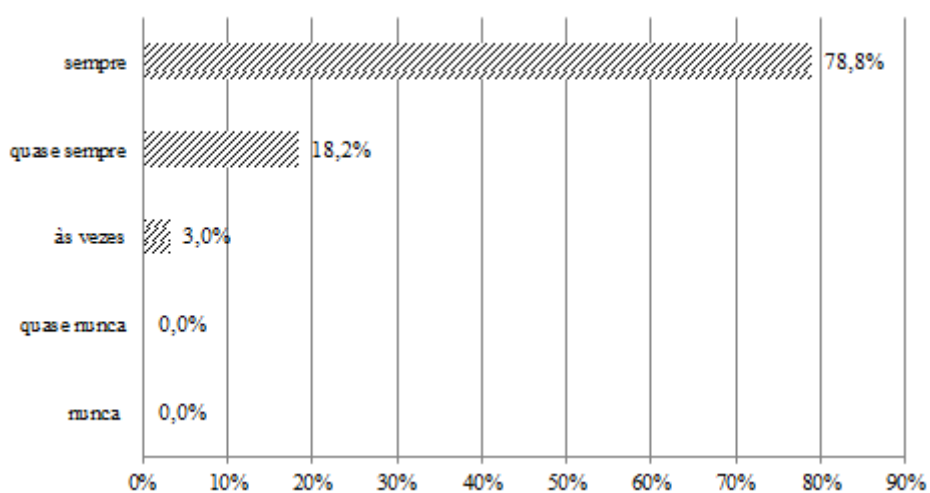
(g) – Horas diárias na condução de veículo



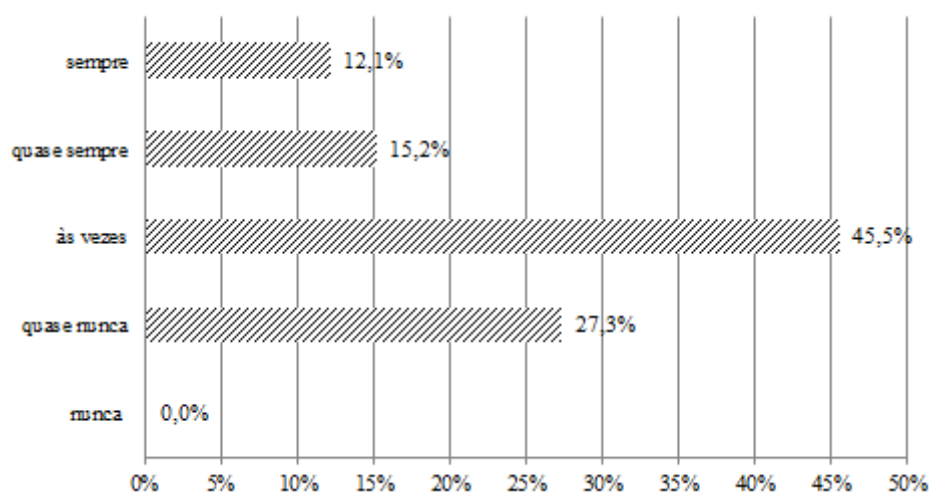
(h) – Segmento automotivo ao qual pertence os veículos dos avaliadores



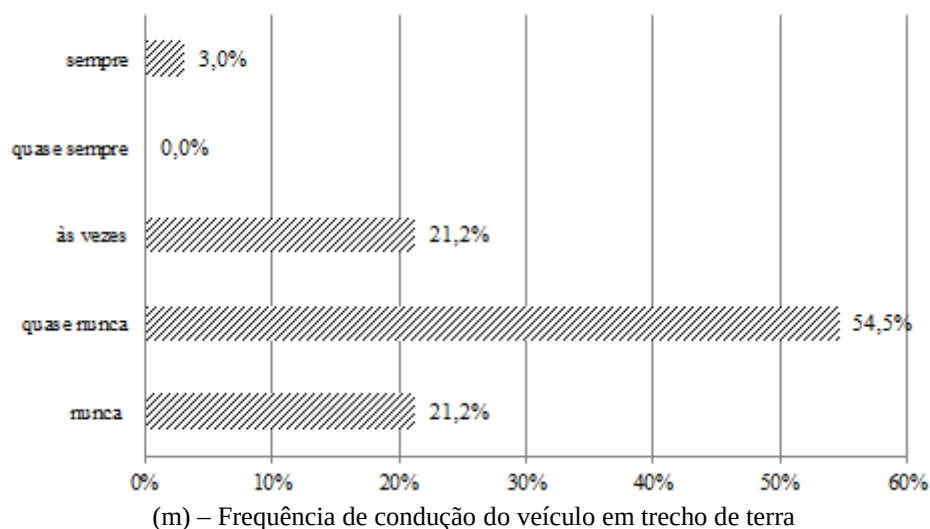
(i) – Frequência de condução do veículo em trecho de estrada



(j) – Frequência de condução do veículo em trecho urbano



(l) – Frequência de condução do veículo em trecho de calçamento



No GRA. 6.2 são visualizados os atributos mais importantes que os avaliadores adotam na escolha de um automóvel. Observa-se que o item conforto é o mais indicado e o design vem como segundo atributo mais importante. Em seguida, itens como consumo, preço e potência se confundem como parâmetro de preferência do público.

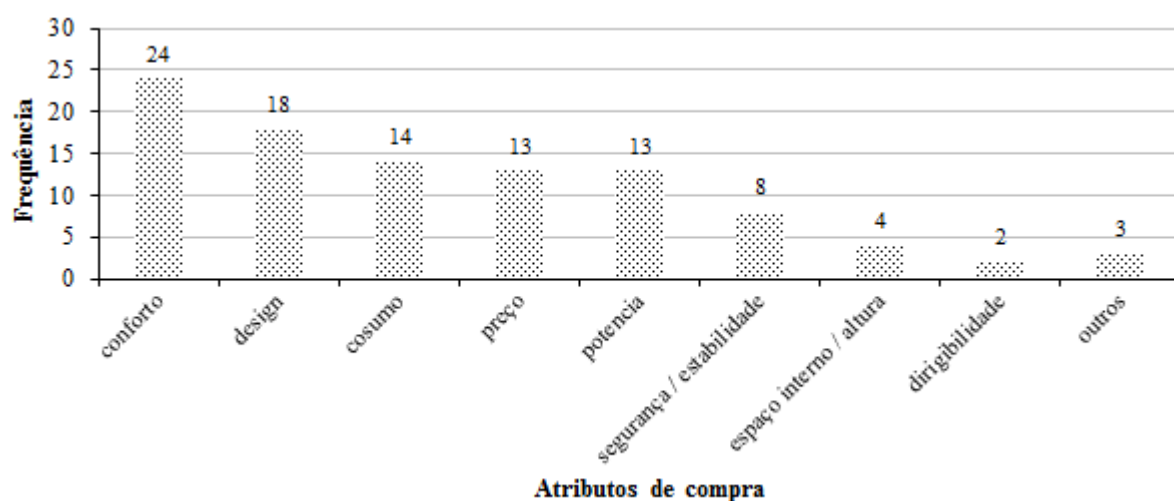


GRÁFICO 6.2– Atributos mais importantes para aquisição de um veículo

Apresentam-se no GRA. 6.3 as notas que os avaliadores atribuíram a importância do conforto acústico e vibracional para aquisição ou permanência com um veículo. Verifica-se que o conforto acústico tem maior relevância sobre o vibracional com maiores percentuais de nota 6. Esta diferença basicamente equivale a maior incidência de nota 4 para o conforto vibracional. Apenas uma faixa de 11% dos avaliadores atribui nota máxima para importância do conforto acústico e vibracional, o que de certa forma evidencia que o conforto apontado no

GRA.6.2 como principal atributo de compra, realmente abrange muito mais outras características dos veículos do que as relacionadas à vibroacústica.

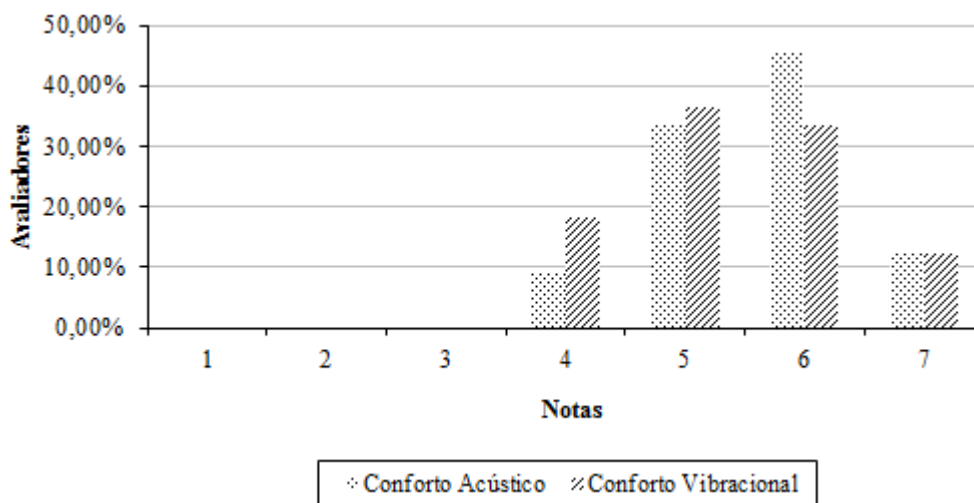


GRÁFICO 6.3 – Grau de importância do conforto acústico e vibracional

6.1.2 – Avaliação dos veículos – Conforto acústico

O GRA. 6.4 apresenta o resultado da pesquisa no que se refere ao conforto acústico percebido. Considerando apenas a avaliação global ou geral do veículo, após finalizar todo o circuito, tem-se como classificação do melhor para o pior a sequência dos veículos C, B, D, E e A.

Na condição global, a definição do pior veículo é apresentada de forma sutil entre os dois piores avaliados. Verifica-se que exceto o veículo D, todos os demais apresentaram uma grande degradação de seus desempenhos acústicos no trecho de calçamento. O veículo D ao contrário obteve nesse trecho uma nota compatível com a sua avaliação global e em estrada.

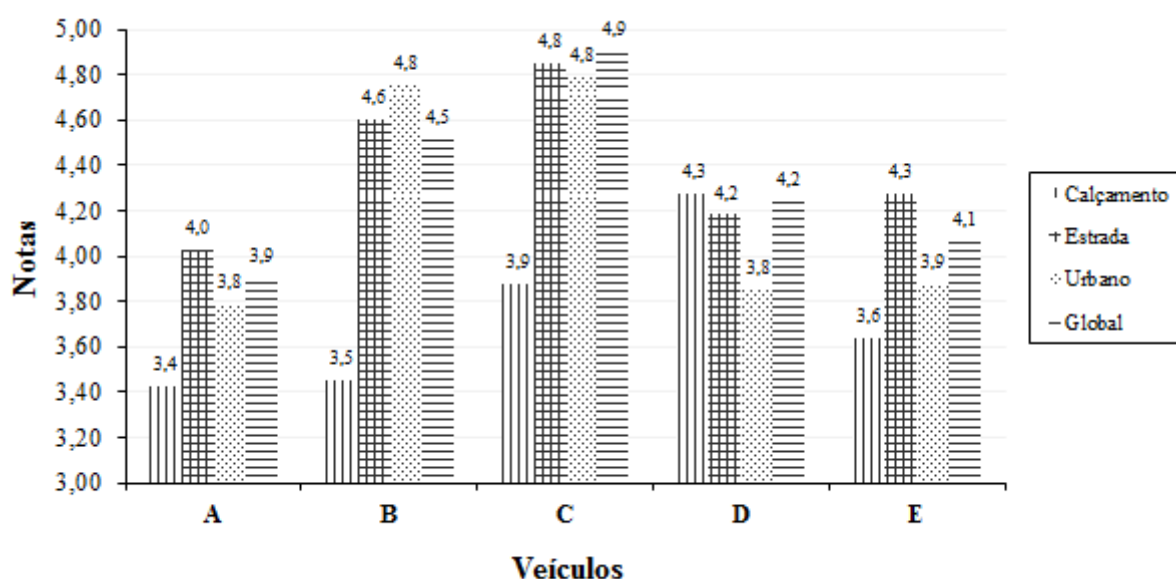


GRÁFICO 6.4 – Notas para conforto acústico

Ao final de pesquisa, após término da avaliação dos 5 veículos, os participantes foram solicitados a classificarem os veículos segundo o conforto acústico (GRA.6.5) e vibracional (GRA.6.22). O objetivo dessa questão seria o de reforçar a avaliação individual de cada veículo após a comparação com todos os demais. O que se verifica na figura abaixo é que de forma geral as avaliações foram coerentes quando comparada as notas atribuídas na condição global. Em torno de 54% da amostra indicou o veículo C como o melhor, seguido dos veículos B, D, A e E. Uma divergência é apontada para a indicação do pior veículo o que, de certa forma, era esperado pela baixa diferença de notas atribuídas entre esses dois últimos.

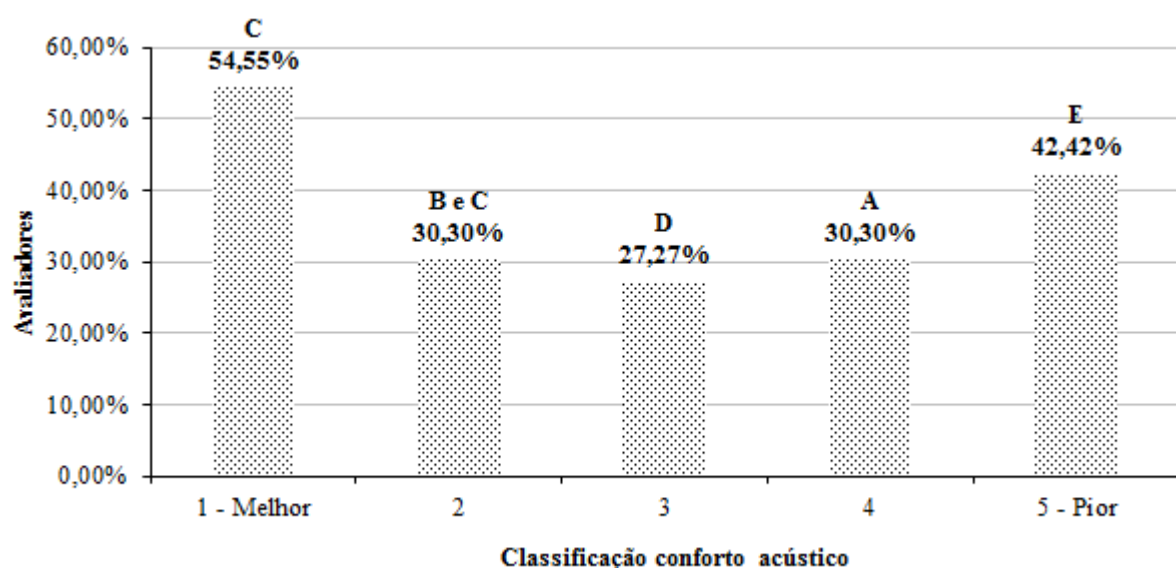


GRÁFICO 6.5 – Classificação final dos veículos para conforto acústico

O GRA.6.6 apresenta as notas de conforto acústico por trecho avaliado. Verifica-se que nenhuma das três condições avaliadas: calçamento, estrada e urbano, traduzem exatamente a avaliação global. Em trecho de estrada e urbano essas diferenças são sutis, no calçamento, entretanto, pode-se afirmar que a generalização é proibitiva. Em outras palavras, a definição de conforto para esse trecho é específica não cabendo aplicação de um modelo encontrado para as demais condições. Nos trechos de estrada e urbano observa-se a nítida diferença de percepção de conforto para os veículos B e C em relação aos demais, enquanto que no calçamento esse mesmo comportamento é verificado para o veículo D.

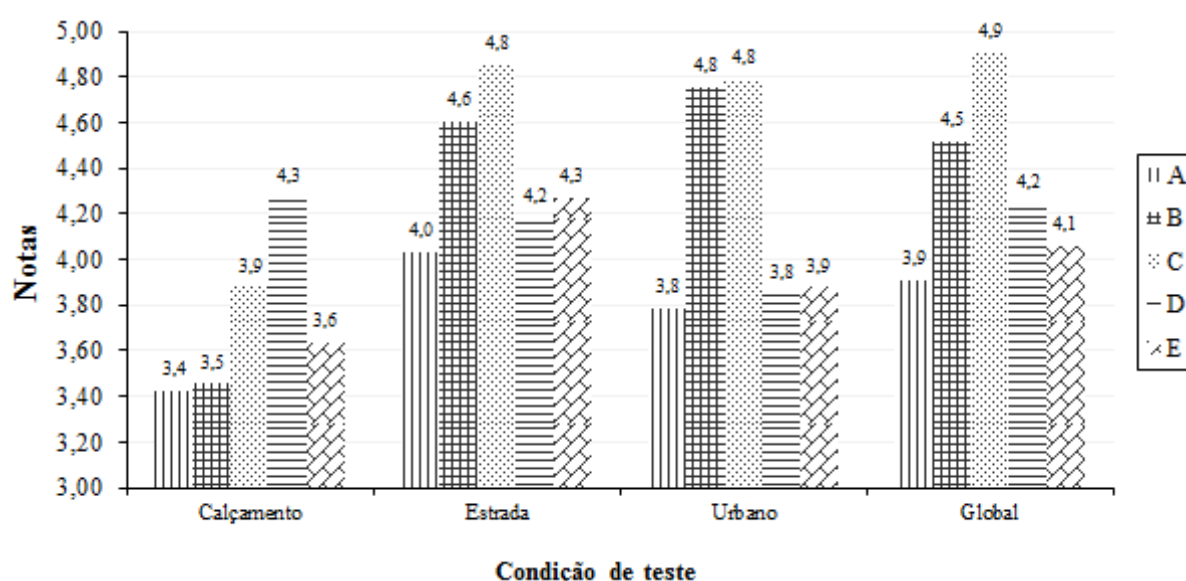


GRÁFICO 6.6 – Notas para conforto acústico por trecho avaliado

Nos GRA.6.7 a 6.17 são apresentados os principais incômodos de ruídos percebidos durante as avaliações em cada percurso. Ressalta-se que esses incômodos foram descritos aleatoriamente e de forma livre pelo avaliador. A tipologia dos ruídos percebidos foram apenas agrupadas de acordo com as suas respectivas frequências. No GRA.6.7 é observado os resultados para o trecho de calçamento, verifica-se que praticamente toda a reclamação é devida a ruídos tipo “grilos” normalmente relacionados a problemas de acabamento. De forma menos relevante são apontados ruídos percebidos devido a rodagem dos pneus ou sistema de suspensão.

Ao observar na estratificação por veículo no GRA.6.8 verificam-se que todos os veículos possuem praticamente a mesma avaliação do ponto de vista de ruídos tipo “grilos”, apontando apenas uma diferença de 5% no número de reclamação entre o melhor veículo avaliado (E) e o pior (B).

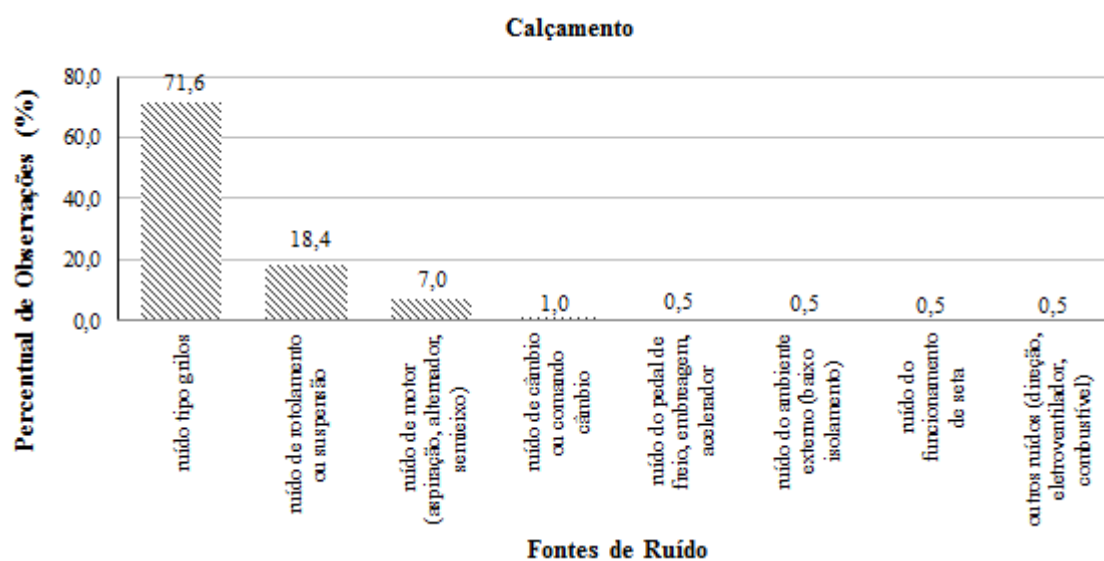


GRÁFICO 6.7 – Ruídos incômodos em trecho de CALÇAMENTO

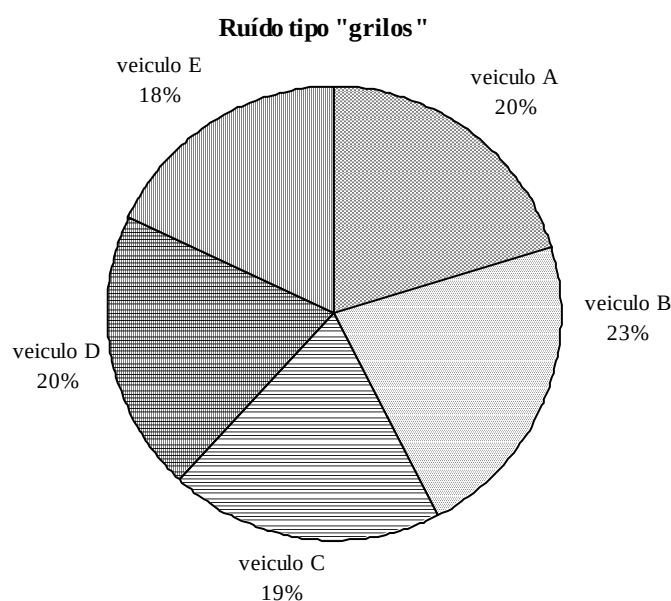


GRÁFICO 6.8 – Ruídos tipo “grilos” por veículo - CALÇAMENTO

Quanto ao ruído de “rolamento” ou suspensão os veículos A e C apresentam um melhor comportamento em relação ao demais (GRA.6.9). Ressalta-se que apesar do veículo D ter obtido uma avaliação superior a todos os demais nesse trecho de avaliação, apresentou praticamente os mesmos índices de reclamação que os outros veículos. Esse comportamento parece indicar que outro tipo de conforto ou característica do veículo D tenha exercido maior influência sobre a avaliação acústica.

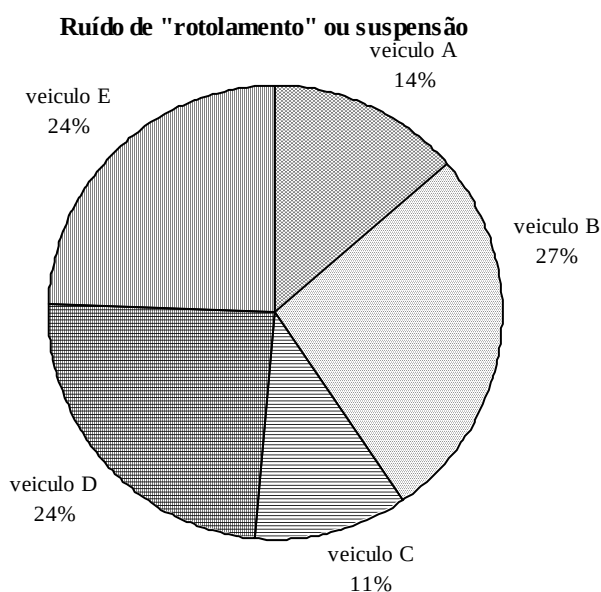


GRÁFICO 6.9 – Ruídos de “rotação” ou de suspensão - CALÇAMENTO

O GRA.6.10 apresenta os principais tipos de ruído reclamados durante avaliação em estrada. O maior incômodo foi verificado pelo ruído aerodinâmico, o que de certa forma é coerente devido às velocidades do veículo praticadas nesse trecho. Como segundo item observado aparece com praticamente a mesma frequência o ruído de motor e tipo “grilos”. Ainda em destaque, mas com metade das reclamações em relação ao ruído aerodinâmico é verificado o ruído de “rotação” ou suspensão.

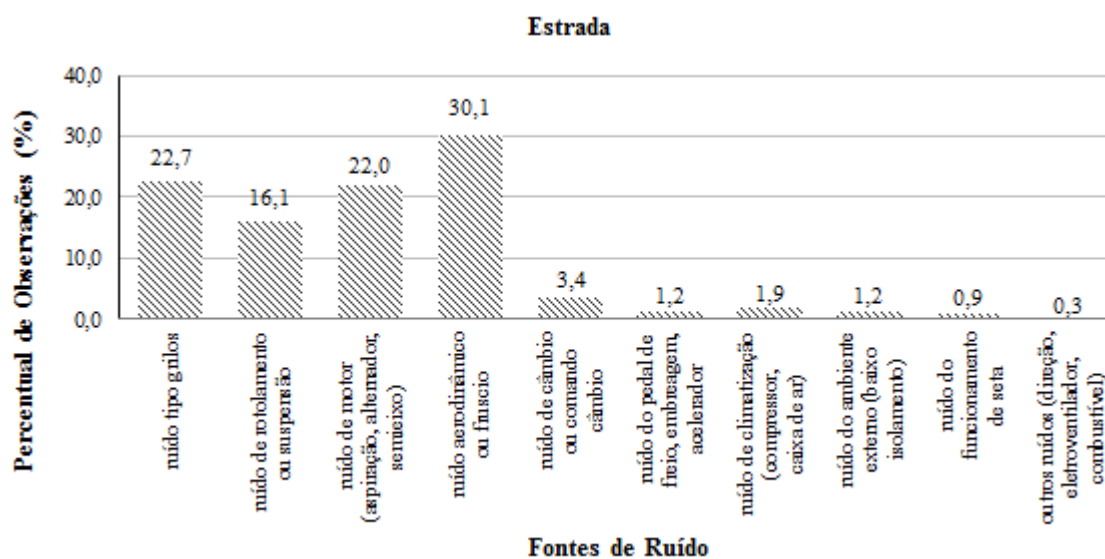


GRÁFICO 6.10 – Ruídos incômodos em trecho de ESTRADA

Em relação ao ruído aerodinâmico ou de “fruscio” os veículos B e E apresentaram um menor número de reclamações em relação aos demais (GRA.6.11).

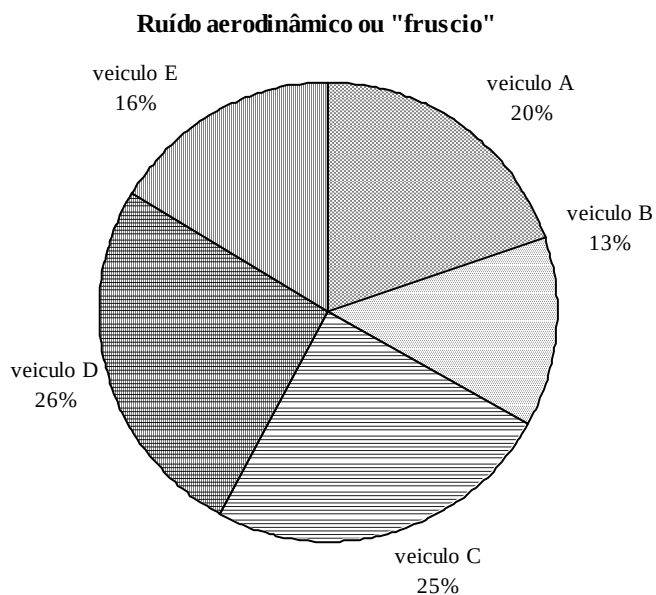


GRÁFICO 6.11 – Ruídos aerodinâmicos ou “fruscio” - ESTRADA

Já para ruídos tipo “grilos” pode-se dizer que os veículos são similares, com uma diferença não superior a 5% entre o melhor (A) e o pior (C) veículo (GRA.6.12).

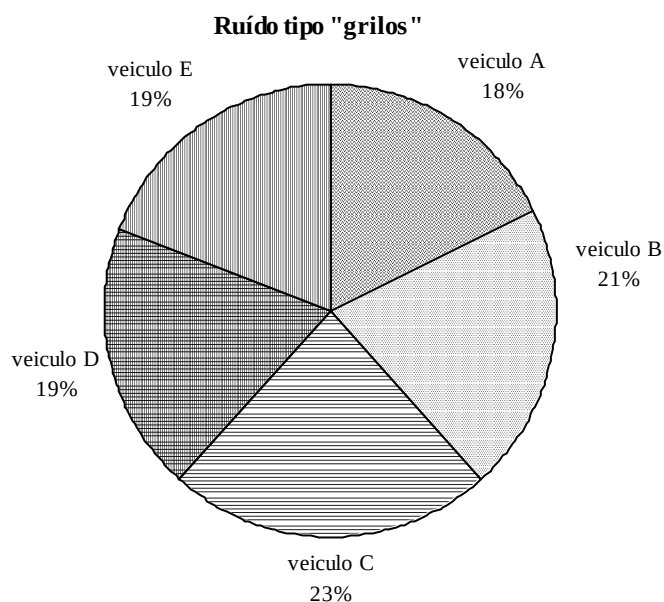


GRÁFICO 6.12 – Ruídos tipo “grilos” - ESTRADA

No GRA.6.13 a incidência de reclamações de ruído de motor representa exatamente a avaliação em nota que os veículos obtiveram nesse trecho. Percebe-se uma acentuada diferença entre os veículos classificando-os na mesma ordem em que foram avaliados. Esse

comportamento parece indicar que o ruído proveniente do motor e acessórios é o mais representativo para determinação do conforto acústico em trecho de estrada.

Ruído de motor (aspiração, alternador, semieixo)

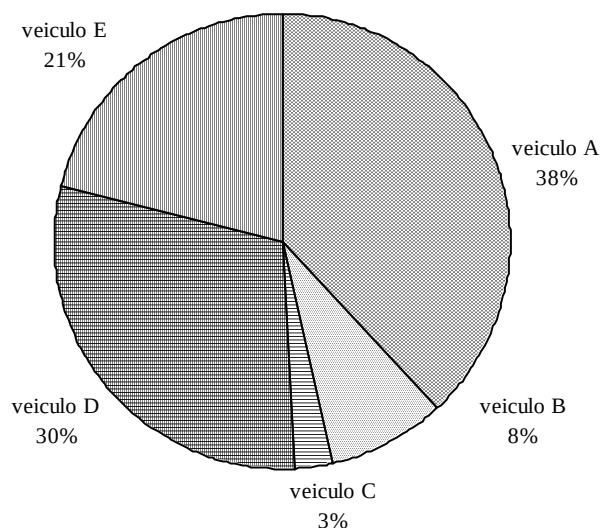


GRÁFICO 6.13 – Ruídos de motor e acessórios - ESTRADA

Ruídos de “rotação” ou de suspensão foram mais percebidos para o veículo B, enquanto os veículos A e E apresentaram os melhores resultados. De forma similar, parece ser possível dizer que esse tipo de ruído não é percebido de forma severa, uma vez que os melhores veículos avaliados nesse trecho (C e B) apresentaram o maior número de reclamações veículo (GRA.6.14).

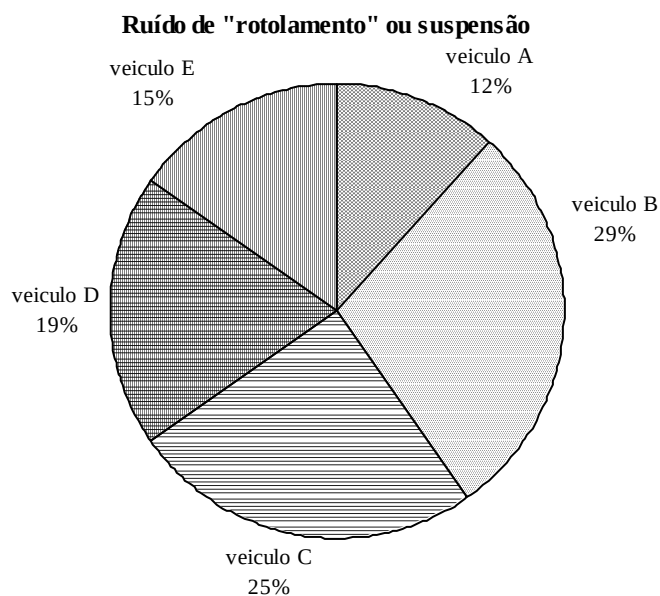


GRÁFICO 6.14 – Ruídos de “rotação” ou de suspensão - ESTRADA

No GRA.6.15 são apresentados os tipos de ruídos percebidos durante o percurso urbano. Pode-se dizer que praticamente dois tipos se destacaram em relação aos demais: os ruídos de motor e os ruídos tipo “grilos”.

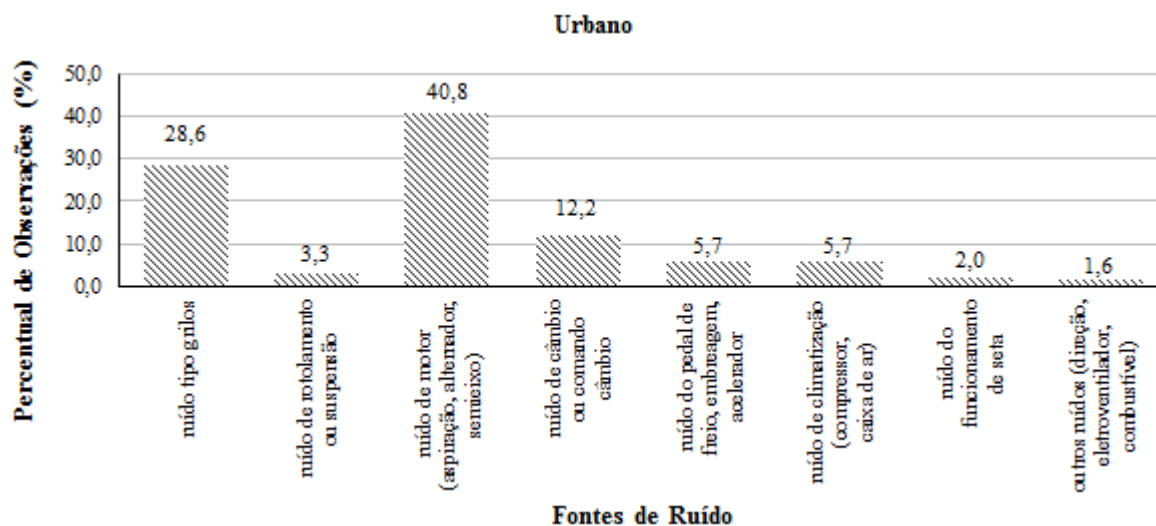


GRÁFICO 6.15 – Ruídos incômodos em trecho URBANO

Assim como no percurso em estrada, os ruídos provenientes do motor aparecem como melhor indicador do conforto acústico percebido no trecho urbano. As distinções entre os veículos e sua classificação em relação ao número de reclamação demonstram o mesmo resultado encontrado em relação às notas de avaliação (GRA.6.16).

Ruído de motor (aspiração, alternador, semieixo)

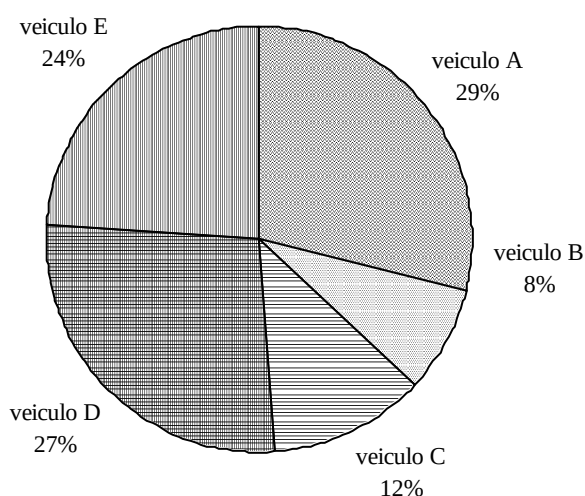


GRÁFICO 6.16 – Ruídos de motor e acessórios - URBANO

Verifica-se por último, que os ruídos tipo “grilos” são também reclamados no trecho urbano destacando, porém, um melhor comportamento para os veículos A e D. Entretanto, parece coerente dizer que esse tipo de ruído não é visto como taxativo para a percepção do conforto acústico, uma vez que os veículos melhor avaliados B e C apresentaram o maior índice de reclamações (GRA.6.17).

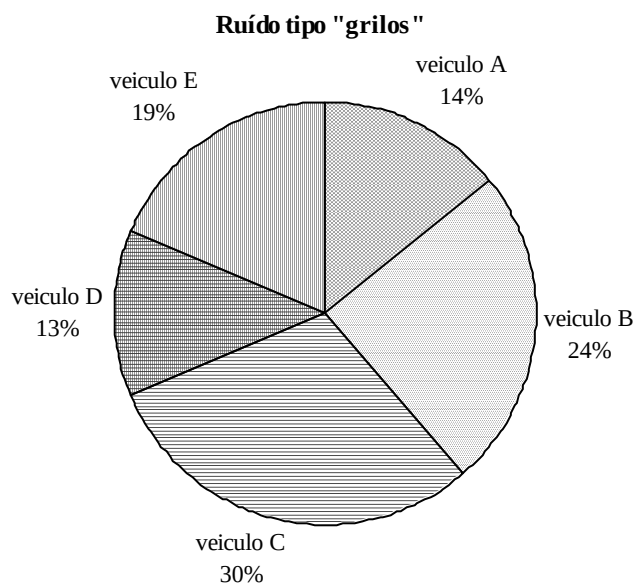


GRÁFICO 6.17 – Ruídos tipo “grilos” - URBANO

Embora o veículo C tenha recebido a melhor avaliação, verifica-se que outros atributos além do conforto acústico, dentre os quais até mesmo outros tipos de conforto percebidos (GRA.6.2) influenciam o público na escolha de compra de um veículo. Esse resultado é demonstrado pela elevada preferência de compra do veículo D, mesmo tendo sido classificado como terceiro em relação ao conforto acústico (GRA.6.18).

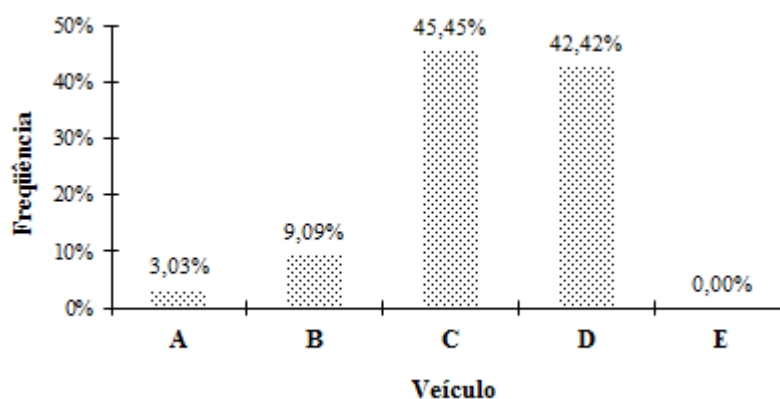


GRÁFICO 6.18 – Preferência de compra de veículos (mesmas condições e preços)

Já como critério de exclusão, o baixo conforto acústico percebido parece impactar junto a outras possíveis características para a decisão de não comprar determinado veículo. O GRA.6.19 apresenta elevados índices de rejeição para os piores veículos avaliados E e A com respectivamente 54,55% e 33,33%.

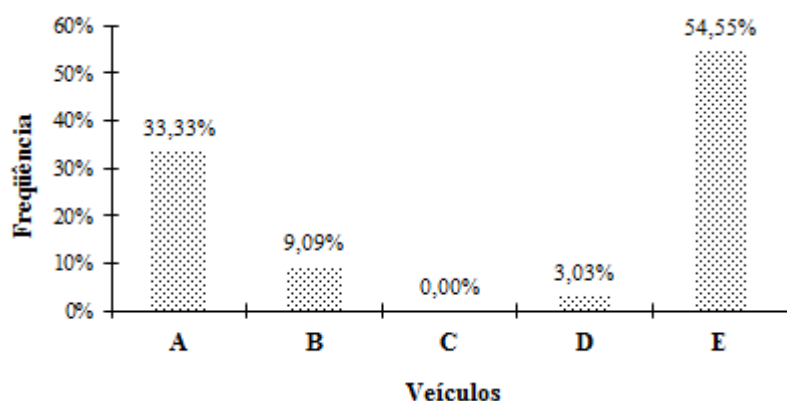


GRÁFICO 6.19 – Veículo que NÃO seria comprado (mesmas condições e preços)

6.2 – Índices de conforto acústico

No GRA.6.20 (a até g) são apresentados os parâmetros objetivos dos veículos por condição de teste. Percebe-se que vários deles não são bons descritores para o conforto acústico, uma vez que apresentam pouca variação sendo difícil a diferenciação entre os veículos. Verifica-se esse comportamento com maior expressividade para o nível de ruído GRA.6.20 (g), para o “loudness” GRA.6.20 (a) e para o índice de articulação GRA.6.20 (f).

Adotando apenas o parâmetro clássico de nível de ruído em dB(A) seria impossível afirmar qual veículo apresenta o melhor e o pior comportamento acústico em qualquer condição de teste avaliada.

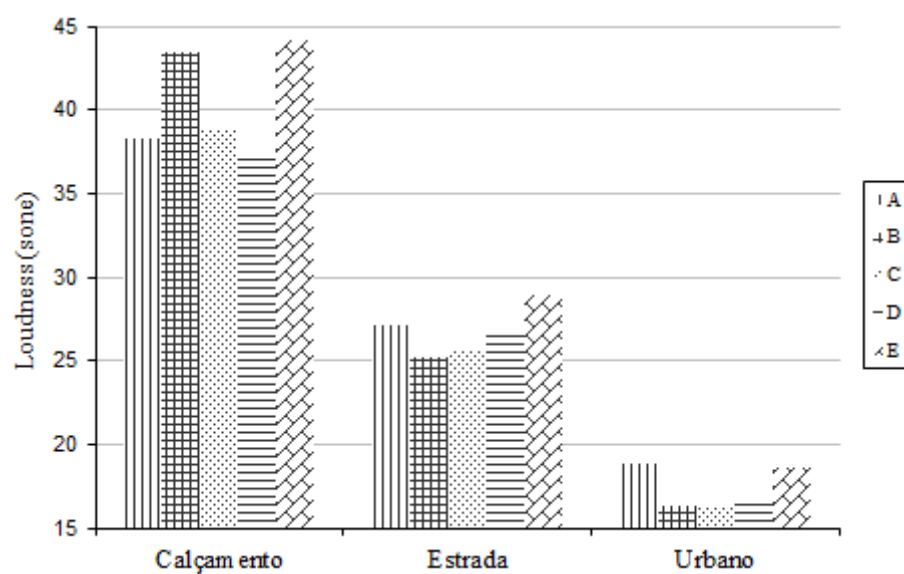
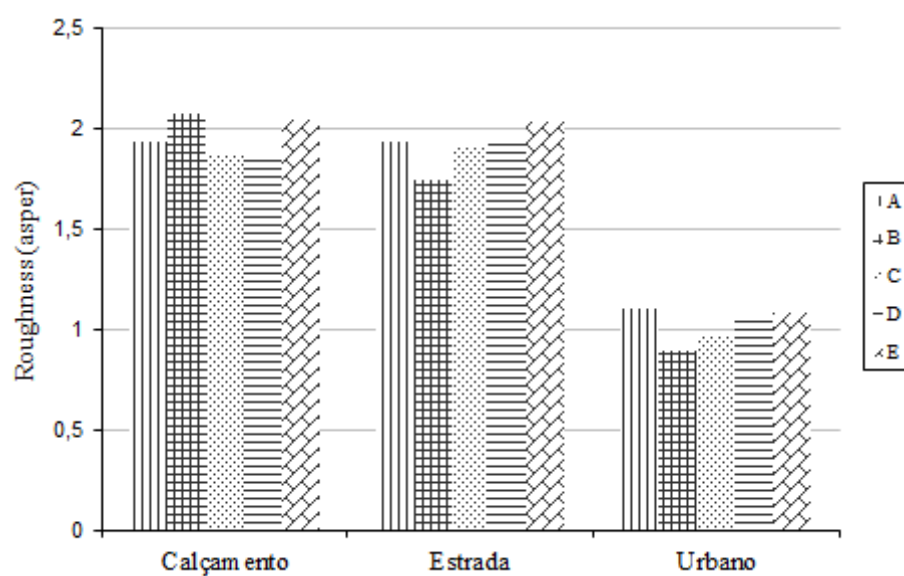
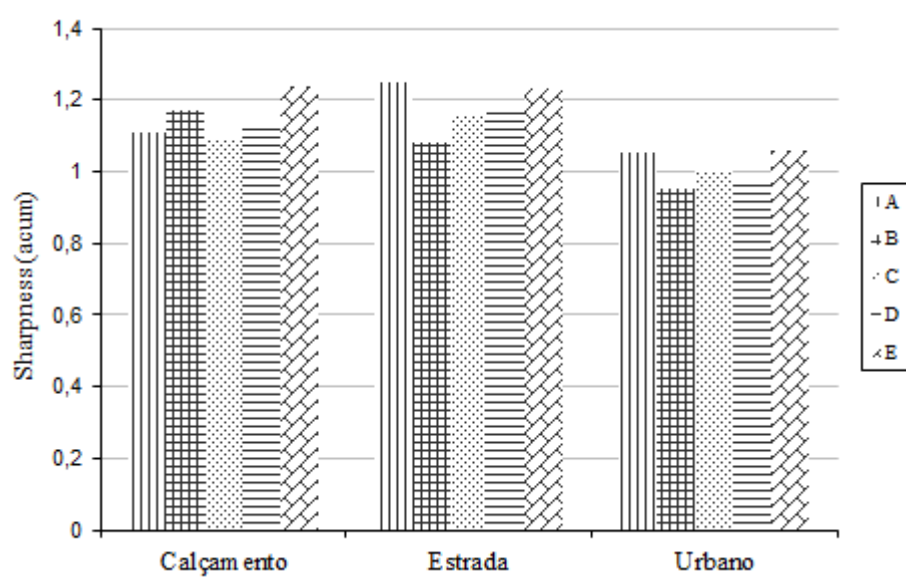


GRÁFICO 6.20 – Parâmetros objetivos x condição de teste

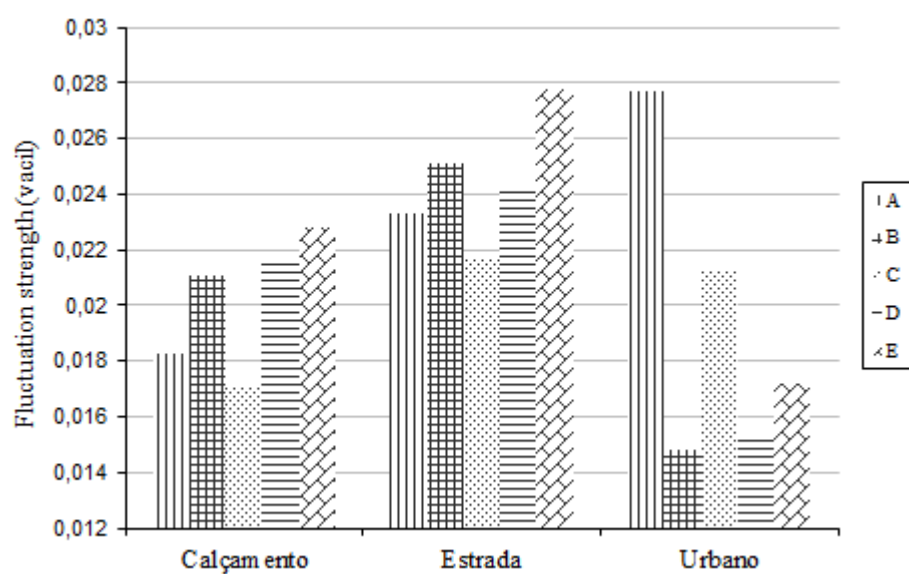
(a) – Valor de “Loudness” em (sones)



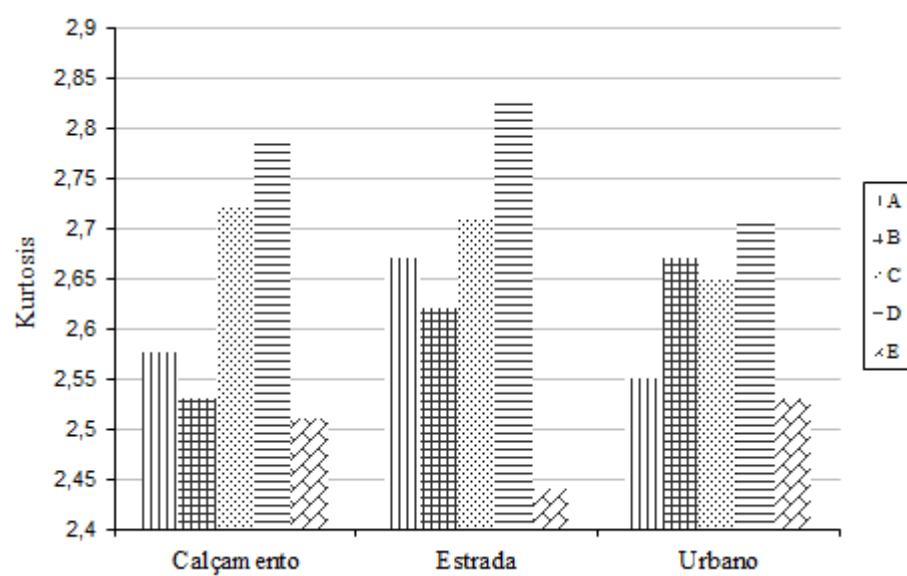
(b) – Valor de “Roughness” em (asper)



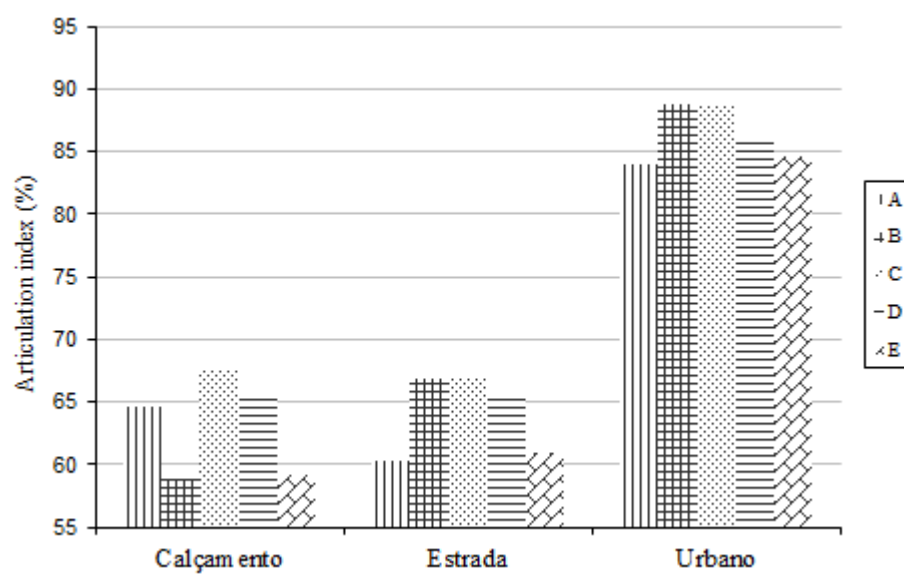
(c) – Valor de “Sharpness” em (acum)



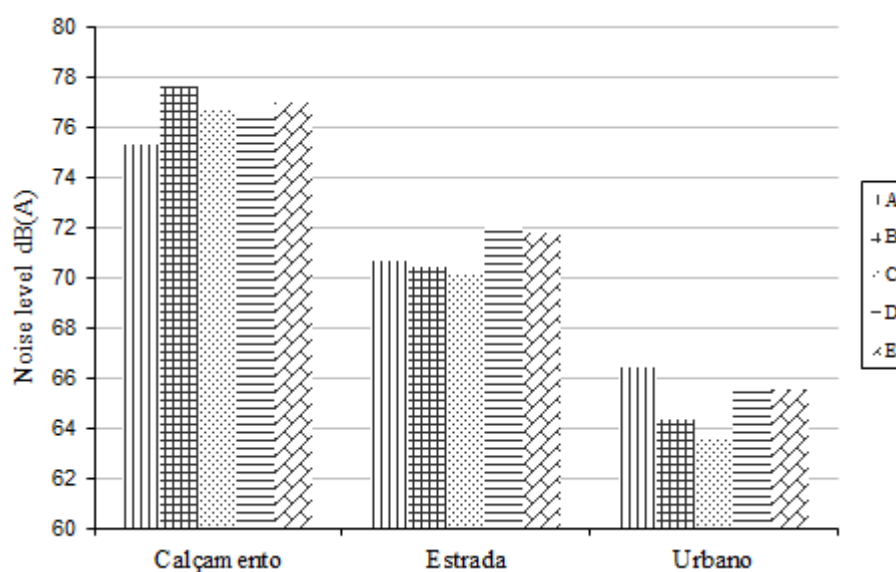
(d) – Valor de “Fluctuation Strenght” em (vacil)



(e) – Valor de curtose



(f) – Valor de Índice de Articulação em (%)



(g) – Valor de Nível de Ruído em dB(A)

Na TAB. 6.3 é apresentado o resumo de todos os parâmetros subjetivos (notas) e objetivos (medidas e métricas calculadas) utilizados no modelo de regressão múltipla para o trecho de calçamento. Ressalta-se também a correspondência de cada parâmetro com as variáveis introduzidas nos modelos.

TABELA 6.1 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Calçamento

CALÇAMENTO								
Variável	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
Veículo	Nota	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (acum)	Fluctuation Strength	Kurtosis	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	3,42	38,25	1,93	1,11	0,01825	2,575	64,6	75,3
B	3,45	43,4	2,065	1,17	0,02105	2,53	58,8	77,6
C	3,88	38,85	1,865	1,085	0,01705	2,72	67,7	76,75
D	4,27	37,2	1,855	1,135	0,02155	2,79	65,8	76,55
E	3,64	44,2	2,035	1,235	0,0228	2,51	59,1	76,95

O primeiro modelo de regressão múltipla para o trecho de calçamento é apresentado na TAB. 6.4. Antes porém, segue uma definição sucinta dos termos apresentados em seu conteúdo (indicados numericamente na própria tabela) conforme descrição a seguir:

1. R-múltiplo: raiz quadrada de R-quadrado.
2. R-quadrado: coeficiente de determinação que mede a proporção da variação de y que é explicada através das variáveis independentes

3. R-quadrado ajustado: coeficiente de determinação indicado para regressões múltiplas, pois além de refletir o número de variáveis explanatórias do modelo, também considera o tamanho da amostra.
4. Erro padrão: desvio padrão em torno da linha de regressão
5. Observações: tamanho da amostra
6. Resíduos: é igual à diferença entre o valor observado de Y e o valor previsto de Y
7. gl: graus de liberdade da regressão (k), do erro (n-k-1) e total (n-1), na qual k corresponde ao número de variáveis explanatórias do modelo.
8. SQ: soma dos quadrados devido a regressão, aos resíduos, e ao total das diferenças
9. MQ: média dos quadrados devido a regressão e aos resíduos, o quociente entre essas duas grandezas é o valor de F
10. F: estatística utilizada para testar se existe uma relação significativa entre a variável dependente e o conjunto de variáveis explanatórias.
11. F de significação: representa a probabilidade de ser verificada uma relação significativa entre a variável dependente e o conjunto de variáveis explanatórias, se, de fato, não existir nenhuma relação entre as variáveis do modelo.
12. Coeficientes: coeficientes líquidos de regressão b_0 (interseção com o eixo y) e os demais coeficientes de regressão $b_1, b_2, b_3 \dots$. Medem a média de alteração em Y por cada unidade de alteração em um determinado X, mantendo constante o efeito das outras variáveis X.
13. Erro padrão: desvio padrão em torno da linha de regressão
14. Stat t: estatística t utilizada para testar a inclinação, ou seja, para verificar a existência de uma relação significativa entre as variáveis X e Y (a hipótese nula prevê que não existe nenhuma relação). Se ela for rejeitada existem evidências de uma relação linear.
15. Valor-p: representa a probabilidade de ser verificada uma relação linear de mesma dimensão ou mais forte, se, de fato, não existir nenhuma relação linear entre as variáveis do modelo.
16. 95% inferiores e superiores: intervalo de confiança no qual se encontra os valores dos coeficientes encontrados com a significância de 0,05.

TABELA 6.2 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de calçamento – Variáveis X4X6X7

Estatística de regressão						
R múltiplo	0,999891448	← 1				
R-Quadrado	0,999782909	← 2				
R-quadrado ajustado	0,999131635	← 3				
Erro padrão	0,010363847	← 4				
Observações	5	← 5				
ANOVA		7	8	9	10	11
		gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão		3	0,494658431	0,164886144	1535,119437	0,018759253
Resíduo	← 6	1	0,000107409	0,000107409		
Total		4	0,49476584			16
		12	13	14	15	
		Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores 95% superiores
Interseção		-19,81195871	0,611501749	-32,3988586	0,019643214	-27,58182513 -12,0420923
Fluctuation Strength		148,1797638	3,140160715	47,18859233	0,013488949	108,2802389 188,0792888
Índice de Articulação		0,130624603	0,001937801	67,40866714	0,00944349	0,106002503 0,155246703
Nível de ruído		0,160583018	0,007311664	21,96258141	0,028966558	0,067679517 0,253486519

De acordo com TAB. 6.4, o primeiro modelo de regressão múltipla para o trecho de calçamento é composto pelos parâmetros de “fluctuation strenght”, índice de articulação e nível de ruído. Segundo os cálculos, 99,9% ($R_{2,aj}$) da variação das notas em trecho de calçamento são explicadas por esses três parâmetros, com uma probabilidade de apenas 1,9% (F_{sig}) dessa afirmação não ser verdadeira. Abaixo segue a descrição do modelo encontrado através da EQ. (6.1 a e b):

$$ICA_{1-\text{calçamento}} = 148,1FS + 0,13IA + 0,16NR - 19,81 \quad (6.1 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICA'_{1-\text{calçamento}} = 1,01FS + 1,50IA + 0,38NR + 3,83 \times 10^{-16} \quad (6.1 - b)$$

Na qual:

NR: é o nível de ruído em dB(A)

IA: é o índice de articulação em %

FS: é a modulação calculada pela métrica “fluctuation strenght” em vacil

Entretanto, outros dois modelos também foram calculados para esse trecho. Na TAB. 6.5 e EQ. (6.2 a e b) o ICA é descrito pelos parâmetros “roughness”, “fluctuation strenght” e nível de ruído, explicando em torno de 99,95% da nota para essa condição com uma significância de 1,33%.

TABELA 6.3 – Modelo 02 de regressão linear múltipla para o trecho de calçamento – Variáveis X2X4X7

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,999945499
R-Quadrado	0,999891001
R-quadrado ajustado	0,999564006
Erro padrão	0,007343619
Observações	5

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	0,494711911	0,16490397	3057,811995	0,01329268
Resíduo	1	5,39287E-05	5,39287E-05		
Total	4	0,49476584			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-2,687101821	0,367379607	-7,31423783	0,086502116	-7,355102324	1,980898682
Roughness	-4,570566432	0,048041843	-95,1371993	0,00669135	-5,180995931	-3,960136934
Fluctuation Strength	86,41997771	1,885751183	45,82787937	0,013889335	62,45923711	110,3807183
Nível de ruído	0,177378851	0,005237667	33,86600597	0,018792734	0,110827986	0,243929716

$$ICA_{2-\text{calçamento}} = -4,57R + 86,42FS + 0,18NR - 2,69 \quad (6.2 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

(6.2 - b)

$$ICA'_{2-\text{calçamento}} = -1,25R + 0,59FS + 0,42NR - 6,45 \times 10^{-16}$$

Na qual:

R: é a aspereza calcula pela métrica “roughness”

Uma terceira equação de ICA é gerada no modelo apresentado na TAB. 6.6. Observam-se dois novos parâmetros sendo utilizados para descrição do conforto no mesmo trecho de calçamento. O índice agora é descrito pelos parâmetros “sharpness” e curtose, com coeficientes de determinação parecidos e melhor nível de significância 0,2% (o que era esperado visto que o modelo com menos variáveis explanatórias apresenta uma incerteza reduzida se comparado com as demais variáveis). Esse comportamento parece indicar certa

difículdade em se determinar a existência ou não de métricas mais apropriadas para avaliação do conforto acústico em trecho de calçamento.

TABELA 6.4 – Modelo 03 de regressão linear múltipla para o trecho de calçamento – Variáveis X3X5

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,999079763
R-Quadrado	0,998160374
R-quadrado ajustado	0,996320747
Erro padrão	0,021332888
Observações	5

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	0,493855656	0,246927828	542,5886588	0,001839626
Resíduo	2	0,000910184	0,000455092		
Total	4	0,49476584			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-9,607249671	0,511217044	-18,7928978	0,002819504	-11,80683908	-7,407660261
Sharpness	3,426050405	0,236667297	14,47623075	0,004737988	2,407753213	4,444347598
Kurtosis	3,585105977	0,111871964	32,04650974	0,00097231	3,103759767	4,066452187

A última equação de ICA para o trecho de calçamento é apresentada na EQ. (6.3 a e b) abaixo. Verifica-se que pelo tipo de pavimento encontrado nesse trecho (alta irregularidade) e o principal ruído reclamado (ruídos tipo “grilos”), os parâmetros apresentados na EQ. (6.3 a e b) estão em coerência com estudos citados na revisão desse trabalho respectivamente para aplicabilidade da métrica curtose e “sharpness”.

$$ICA_{3-\text{calçamento}} = 3,42S + 3,59K - 9,61 \quad (6.3 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICA'_{3-\text{calçamento}} = 0,57S + 1,26K - 2,02 \times 10^{-15} \quad (6.3 - b)$$

Na qual:

S: é a agudeza calcula pela métrica “sharpness”

K: é a impulsividade do sinal calculada pela métrica curtose

De maneira similar ao trecho de calçamento, a TAB. 6.7 apresenta o resumo de todos os parâmetros subjetivos (notas) e objetivos (medidas e métricas calculadas) utilizada no modelo de regressão múltipla para o trecho de estrada. Observa-se que das 126 combinações possíveis entre os 7 parâmetros considerados, apenas um modelo foi calculado seguindo todas as premissas estatísticas adotadas.

TABELA 6.5 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Estrada

ESTRADA								
Variável	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
Veículo	Nota	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (acum)	Fluctuation Strength	Kurtosis	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	4,03	27,11	1,93	1,25	0,0233	2,67	60,27	70,63
B	4,61	25,23	1,74	1,08	0,0251	2,62	66,8	70,37
C	4,85	25,54	1,9	1,16	0,0217	2,71	66,94	70,16
D	4,18	26,93	1,92	1,17	0,0242	2,83	65,37	72,01
E	4,27	28,91	2,03	1,23	0,0278	2,44	60,88	71,76

O único modelo de regressão representativo do ICA para o trecho de estrada apresentou um coeficiente de determinação de 98,4% com um nível de significância relativamente pior de 8,0%. O índice é representado pelos parâmetros “roughness”, “sharpness” e nível de ruído (TAB. 6.8) e EQ. (6.4 a e b).

TABELA 6.6 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de estrada – Variáveis X2X3X7

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,998028443
R-Quadrado	0,996060774
R-quadrado ajustado	0,984243095
Erro padrão	0,041790268
Observações	5

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	0,44159609	0,147198697	84,28565105	0,079860163
Resíduo	1	0,001746427	0,001746427		
Total	4	0,443342516			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	31,2336106	2,148445574	14,53777139	0,04372187	3,935021269	58,53219992
Roughness	5,158494918	0,519748149	9,924989502	0,063927376	-1,445531468	11,7625213
Sharpness	-8,692964291	0,701908864	-12,3847478	0,051292255	-17,61156202	0,225633436
Nível de ruído	-0,372287412	0,033631211	-11,0696998	0,057354441	-0,799612464	0,055037641

Ressalta-se que nesse trecho o tipo de ruído mais reclamado e que apresenta como possível fator determinante da avaliação realizada foi o ruído de motor e acessórios, o qual classicamente é caracterizado também pelo nível de ruído. Pequenas variações que determinam a diferenciação entre os veículos podem estar relacionadas também a essas sensíveis diferenças entre os parâmetros “roughness” e “sharpness”.

$$ICA_{Estrada} = 5,16R - 8,69S - 0,37NR + 31,23 \quad (6.4 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICA'_{Estrada} = 1,62R - 1,75S - 0,94NR - 7,23 \times 10^{-15} \quad (6.4 - b)$$

Na TAB. 6.9 são apresentados os dados coletados e calculados para avaliação no trecho urbano. Para essa condição foram também calculados três modelos de regressão que podem ser verificados nas TAB. 6.10 a 6.12.

TABELA 6.7 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Urbano

URBANO								
Variável	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
Veículo	Nota	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (acum)	Fluctuation Strength	Kurtosis	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	3,79	18,88	1,1	1,05	0,0277	2,55	84,01	66,43
B	4,76	16,37	0,89	0,95	0,0148	2,67	88,77	64,34
C	4,79	16,25	0,97	1	0,0213	2,65	88,6	63,51
D	3,85	16,56	1,06	0,98	0,0153	2,71	86,08	65,64
E	3,88	18,6	1,08	1,06	0,0172	2,53	84,54	65,49

Um modelo de regressão para ICA em trecho urbano é representado através dos parâmetros “roughness”, “fluctuation strength” e nível de ruído (TAB. 6.10). Assim como no trecho de estrada o ruído de motor foi o item mais reclamado e também bastante coerente com a avaliação. Mais uma vez os parâmetros “roughness” e nível de ruído aparecem como descritores do conforto para essa condição.

TABELA 6.8 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho urbano – Variáveis X2X4X7

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,99979316
R-Quadrado	0,999586362
R-quadrado ajustado	0,99834545
Erro padrão	0,020863558
Observações	5

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	1,05190631	0,350635437	805,5250265	0,025893466
Resíduo	1	0,000435288	0,000435288		
Total	4	1,052341598			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	22,37316738	0,850388538	26,30934728	0,024185832	11,56795651	33,17837824
Roughness	-3,55010395	0,215609265	-16,4654518	0,03861654	-6,28967941	-0,810528489
Fluctuation Strength	20,07876992	2,194883238	9,147990004	0,069315996	-7,809865868	47,96740571
Nível de ruído	-0,229351545	0,015540018	-14,7587696	0,043069188	-0,426806195	-0,031896895

O modelo foi obtido com um coeficiente de determinação de 99,8% e uma significância de 2,6% conforme EQ. (6.5 a e b).

$$ICA_{1-urbano} = -3,55R + 20,08FS - 0,23NR + 22,37 \quad (6.5 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICA'_{1-urbano} = -0,61R + 0,21FS - 0,52NR - 4,08 \times 10^{-15} \quad (6.5 - b)$$

O segundo modelo do trecho urbano tem o ICA representado pelos parâmetros “fluctuation strength”, curtose e índice de articulação (TAB. 6.11). Pode-se verificar que a qualidade do modelo apresenta-se ligeiramente inferior ao primeiro com uma significância de 3,3%.

TABELA 6.9 – Modelo 02 de regressão linear múltipla para o trecho urbano – Variáveis X4X5X6

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,999659035
R-Quadrado	0,999318187
R-quadrado ajustado	0,997272746
Erro padrão	0,026786202
Observações	5

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	1,051624097	0,350541366	488,5589756	0,033242489
Resíduo	1	0,000717501	0,000717501		
Total	4	1,052341598			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-14,49354984	0,656213414	-22,0866406	0,028804077	-22,83153183	-6,155567855
Fluctuation Strength	9,496583971	3,001259982	3,164199046	0,194871091	-28,63803982	47,63120776
Kurtosis	-2,588911777	0,260401672	-9,94199367	0,06381877	-5,897628738	0,719805184
Índice de Articulação	0,292950157	0,008548079	34,27087621	0,018570847	0,184336515	0,401563798

O modelo é apresentado na EQ. (6.6 a e b):

$$ICA_{2-urbano} = 9,5FS - 2,59K + 0,29IA - 14,49 \quad (6.6 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICA'_{2-urbano} = 0,10FS - 0,39K + 1,27IA + 4,42 \times 10^{-15} \quad (6.6 - b)$$

O último modelo de regressão calculado para o trecho urbano é apresentado na TAB. 6.12. Com apenas dois parâmetros descritores é verificado um melhor nível de significância em torno de 0,8%. Trata-se de uma simplificação do segundo modelo no qual apenas a curtose e o índice de articulação são consideradas como variáveis explanatórias. Tal condição sugere que o parâmetro “fluctuation strength” não acrescentar nenhuma informação relevante ao modelo.

Mais uma vez, a existência de três modelos com quatro parâmetros distribuídos de formas distintas, parece indicar a não existência de um único conjunto de métricas mais apropriadas para a descrição do ICA.

TABELA 6.10 – Modelo 03 de regressão linear múltipla para o trecho urbano – Variáveis X5X6

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,996238809
R-Quadrado	0,992491765
R-quadrado ajustado	0,984983529
Erro padrão	0,062853912
Observações	5

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	1,044440369	0,522220185	132,187087	0,007508235
Resíduo	2	0,007901228	0,003950614		
Total	4	1,052341598			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-13,28505806	1,25213629	-10,6099138	0,008766695	-18,67256569	-7,897550436
Kurtosis	-2,896264479	0,566931573	-5,10866676	0,036246005	-5,335574159	-0,4569548
Índice de Articulação	0,290407231	0,019969252	14,54271935	0,004695067	0,204486473	0,376327988

A EQ. para o terceiro modelo para o trecho urbano é apresenta em (6.7 a e b):

$$ICA_{3-urbano} = -2,9K + 0,29IA - 13,29 \quad (6.7 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICA'_{3-urbano} = -0,44K + 1,26IA + 4,66 \times 10^{-15} \quad (6.7 - b)$$

Por último é apresentado um modelo representativo da avaliação global dos veículos (após a finalização de todo o circuito). Os valores subjetivos (notas) listados na TAB. 6.13 referem-se a uma avaliação absoluta de todo o circuito. Os valores objetivos, porém, referem-se às médias calculadas entre os três trechos avaliados.

TABELA 6.11 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Circuito global

GLOBAL								
Variável	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
Veículo	Nota	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (acum)	Fluctuation Strength	Kurtosis	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	3,91	28,08	1,65	1,14	0,0231	2,5983	69,63	72,20
B	4,52	28,33	1,57	1,07	0,0203	2,6067	71,46	73,75
C	4,91	26,88	1,58	1,08	0,0200	2,6933	74,41	73,01
D	4,24	26,90	1,61	1,10	0,0204	2,7767	72,42	73,34
E	4,06	30,57	1,72	1,18	0,0226	2,4933	68,17	73,56

O modelo apresenta três parâmetros descritores para o ICA_{global}, curtose, índice de articulação e nível de ruído. A significância para o modelo é de 4,8% com coeficiente de determinação de 99,4% (TAB. 6.14). Apesar de apresentar dois parâmetros classicamente utilizados no âmbito de conforto veicular (IA e NR), recomenda-se muito critério na utilização desse modelo, uma vez que, conforme já analisado, a percepção de conforto no trecho de calçamento é totalmente destoante das demais condições.

TABELA 6.12 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o circuito global – Variáveis X5X6X7

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,999286496
R-Quadrado	0,9985735
R-quadrado ajustado	0,994294002
Erro padrão	0,02990671
Observações	5

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	0,626102834	0,208700945	233,3388964	0,048077586
Resíduo	1	0,000894411	0,000894411		
Total	4	0,626997245			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	-15,13748216	1,875838907	-8,06971329	0,078489875	-38,97227537	8,697311041
Kurtosis	-2,775305246	0,24251985	-11,443621	0,055490017	-5,856812115	0,306201623
Índice de Articulação	0,237627034	0,010658183	22,29526672	0,028534908	0,102201978	0,373052091
Nível de ruído	0,134625533	0,025040449	5,376322592	0,117073879	-0,183543542	0,452794609

A EQUAÇÃO representativa para o modelo é demonstrada abaixo em (6.8 a e b):

$$ICA_{Global} = -2,78K + 0,24IA + 0,13NR - 15,14 \quad (6.8 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICA'_{Global} = -0,75K + 1,45IA + 0,21NR - 5,75 \times 10^{-16} \quad (6.8- b)$$

6.3 – Análises complementares

6.3.1 – Avaliação dos veículos – Conforto vibracional

Devido a uma possível influência da avaliação vibracional sobre o conforto acústico percebido, serão apresentados como análises complementares ao estudo alguns dos principais resultados obtidos sob o ponto de vista vibracional.

No GRA. 6.21 é observado a classificação geral dos veículos através das notas atribuídas ao conforto vibracional. Assim como na avaliação acústica pode-se dizer que a classificação dos veículos quanto ao conforto vibracional são diferentes para todas as condições testadas. Na avaliação global após o término do circuito os veículos foram classificados do melhor ao o pior em C, D, B, A e E.

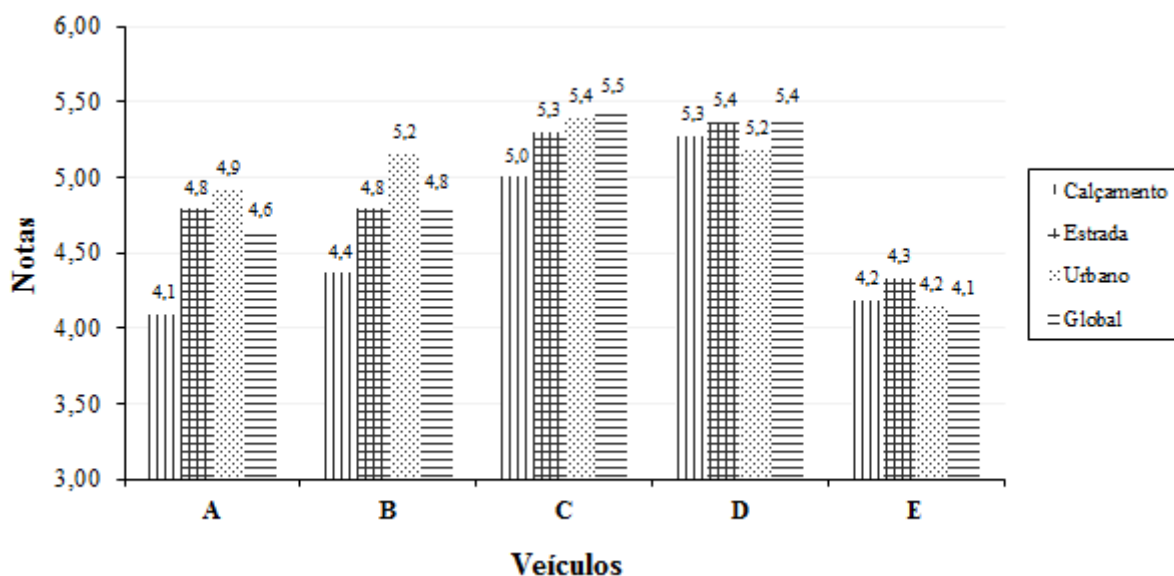


GRÁFICO 6.21 – Notas para conforto vibracional

Ao compararmos o resultado global em nota com aquele atribuído na classificação geral após o término da avaliação dos cinco veículos, observa-se uma maior dificuldade na diferenciação entre os veículos, mantendo, porém, certa coerência entre os dois melhores veículos (D e C) e do pior (E) (GRA. 6.22).

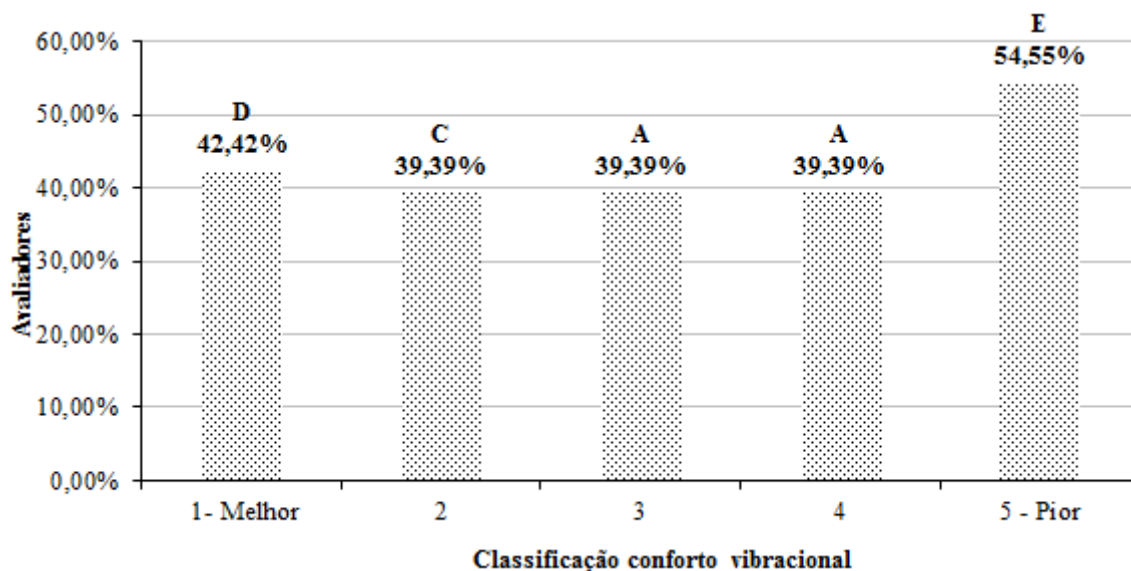


GRÁFICO 6.22 – Classificação final dos veículos para conforto vibracional

Ao visualizarmos a avaliação por percurso é possível perceber que esta se difere em praticamente todos os trechos avaliados, mantendo de certa forma a mesma preferência apenas entre o trecho urbano e a avaliação global (GRA. 6.23). Assim como na avaliação acústica, o veículo D se destaca na condição de calçamento, o que pode indicar, devido a característica desse tipo de pavimento, com as respectivas solicitações sobre o veículo, uma possível influência do conforto vibracional sobre o acústico.

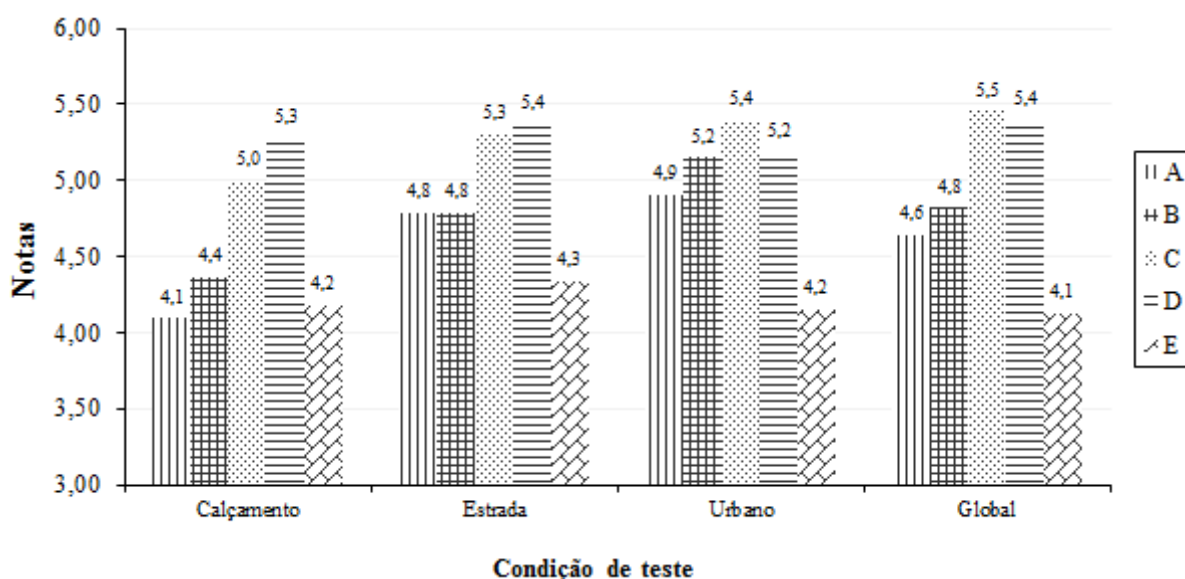


GRÁFICO 6.23 – Notas para conforto vibracional por trecho avaliado

No GRA.6.24 são apresentados as principais reclamações observadas sobre os veículos no trecho de calçamento. De forma geral, nesse trecho os principais incômodos percebidos foram devidos a vibração no volante e vibração dos retrovisores (interno e/ou externos).

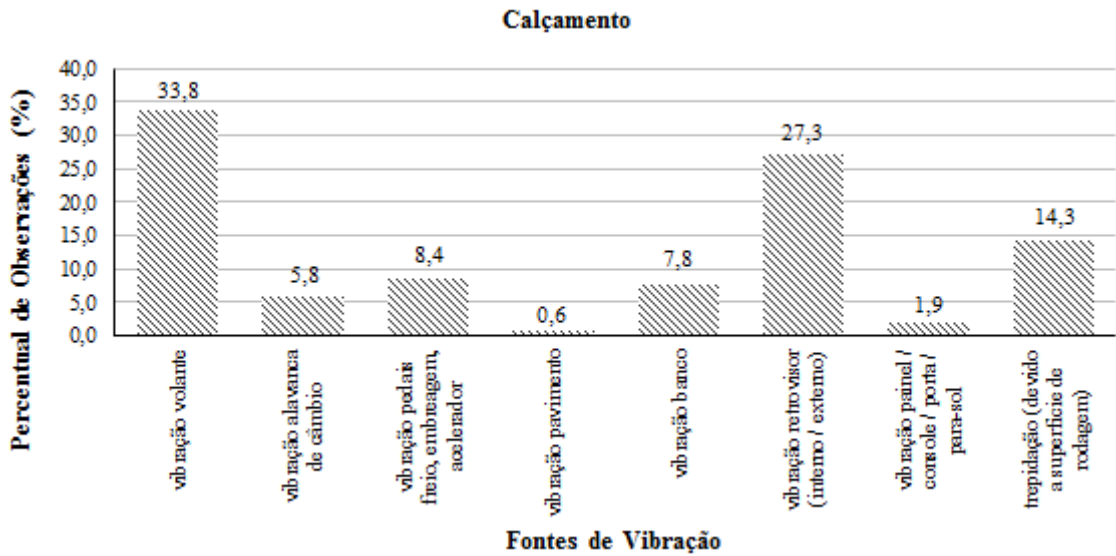


GRÁFICO 6.24 – Vibrações incômodas em trecho de CALÇAMENTO

Na estratificação apresentada no GRA.6.25 e 6.26 verifica-se que os veículos C e D se destacaram de forma positiva com baixos índices de reclamações (até 80% menos), tanto para a vibração percebida no volante como nos retrovisores. Essas características parecem ter impactado diretamente na nota atribuída aos mesmos.

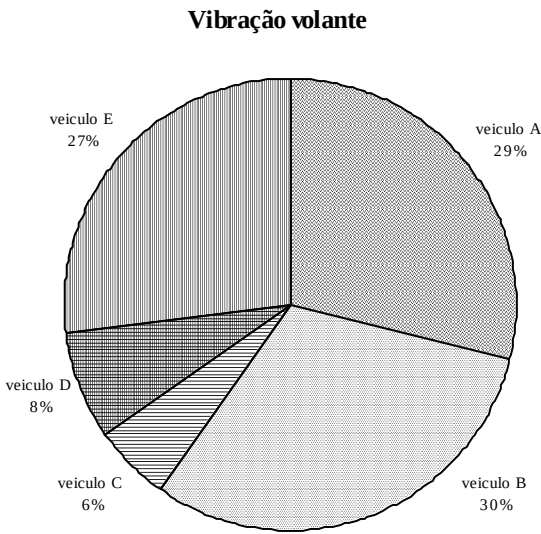


GRÁFICO 6.25 – Vibrações no volante percebida por veículo - CALÇAMENTO

Vibração retrovisor (interno e externo)

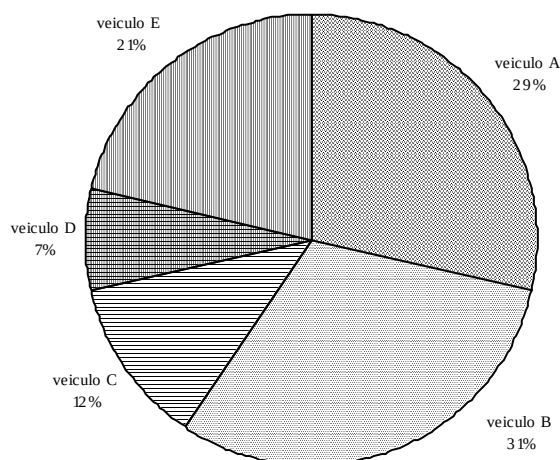


GRÁFICO 6.26 – Vibrações nos retrovisores percebida por veículo - CALÇAMENTO

No trecho de estrada a principal reclamação foi devido a vibração no volante, seguido em menor número da trepidação percebida devido à excitação do tipo de pavimento (GRA.6.27). Outras reclamações ou incômodos tiveram índices semelhantes tais como vibração percebida na alavanca de câmbio, pedais, banco e retrovisores.

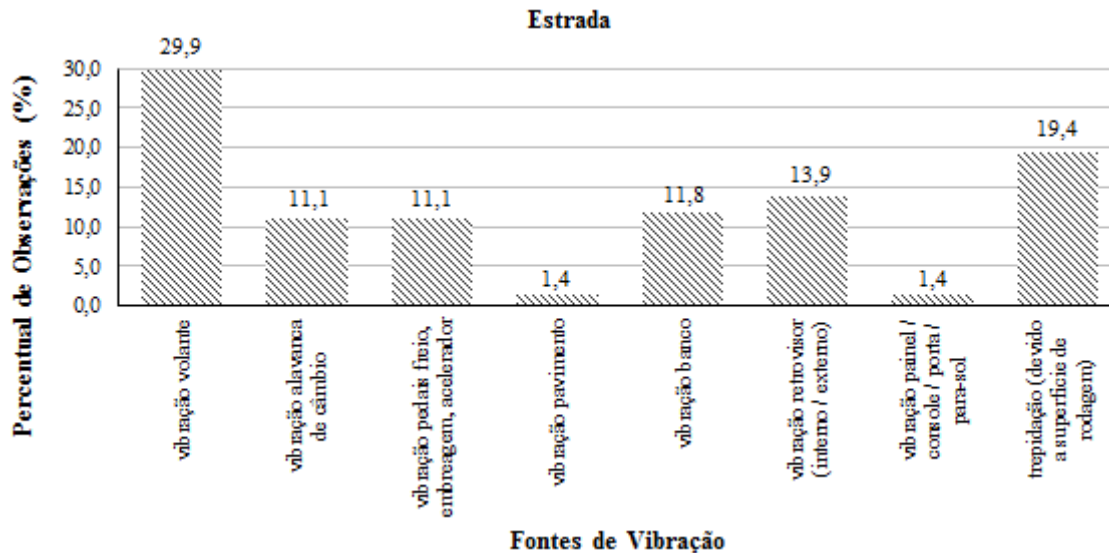


GRÁFICO 6.27 – Vibrações incômodas em trecho de ESTRADA

Analisando o GRA.6.28 e 6.29, a vibração percebida no volante pode ter influenciado a melhor avaliação dos veículos C e D. No caso do veículo A, apesar de um bom comportamento sobre a vibração volante, o grande volume de reclamações sobre a trepidação percebida (o maior índice entre todos os veículos de 32%) parece ter contribuído para uma avaliação inferior quando comparada a dos veículos C e D.

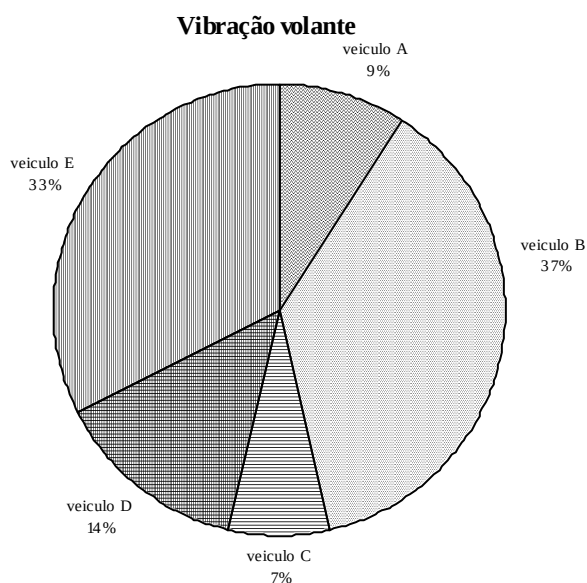


GRÁFICO 6.28 – Vibrações no volante percebida por veículo - ESTRADA

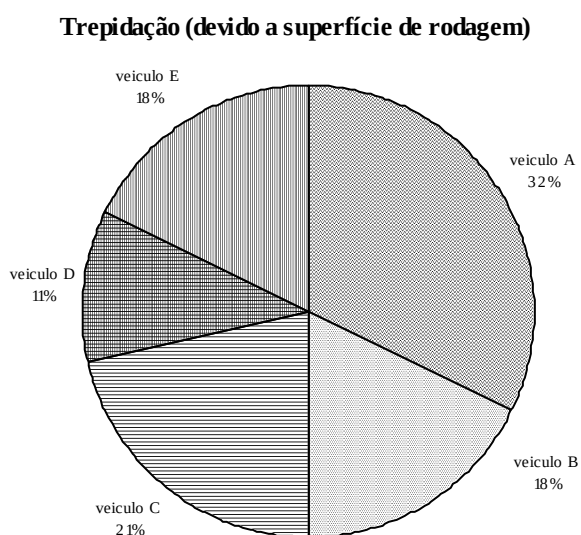


GRÁFICO 6.29 – Trepidações percebidas por veículo - ESTRADA

Por último, no trecho urbano, as principais reclamações foram às mesmas verificadas para o trecho de estrada, ou seja, vibração volante e trepidação, diferenciando-se apenas em quantidade (GRA.6.30).

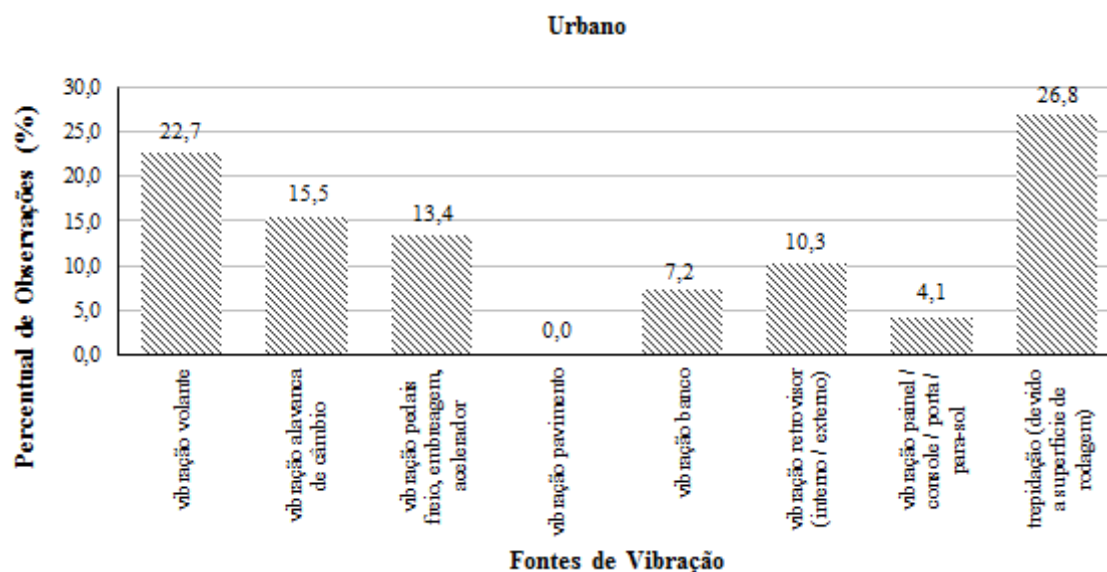


GRÁFICO 6.30 – Vibrações incômodas verificadas em trecho URBANO

Entretanto, ao analisar essas duas reclamações por veículos (GRA.6.31 e 6.32) pode-se observar que para esse trecho a trepidação percebida parece não ter gerado praticamente nenhum impacto sobre a avaliação, uma vez que o melhor veículo (C) apresentou o maior índice de reclamações (31%).

Em contrapartida, a vibração no volante parece ter influenciado diretamente, uma vez que o veículo C possui um índice quase 80% inferior que ao pior veículo (E). Essa diferença está diretamente representada na média das notas atribuídas a esses veículos no trecho urbano (5,39 para o veículo C e 4,15 para o veículo E).

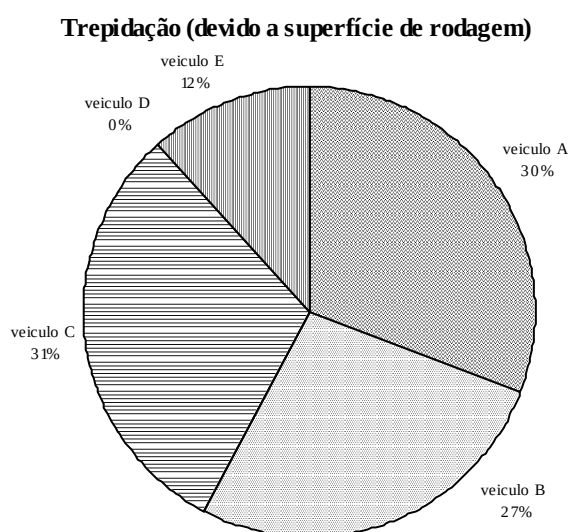


GRÁFICO 6.31 – Trepidações percebidas por veículo - URBANO

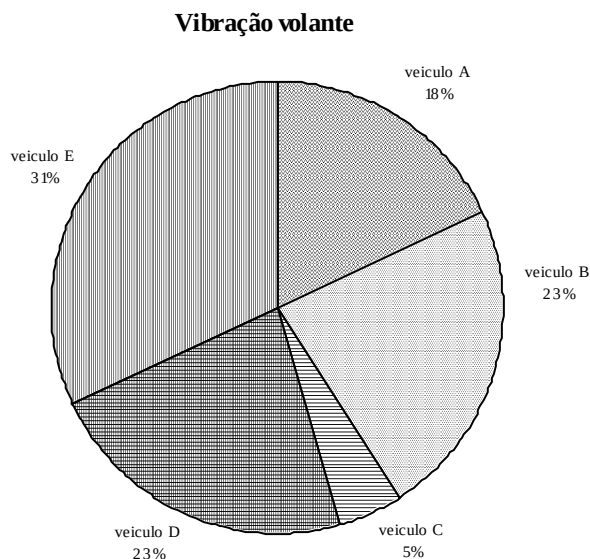


GRÁFICO 6.32 – Vibrações no volante percebida por veículo - URBANO

6.3.2 – Índices de conforto vibracional

Nessa seção, com o objetivo principal de uma simples caracterização, foram desenvolvidas na primeira parte (6.3.2.1) algumas equações denominadas de ICV (índice de conforto vibracional) relacionado às notas subjetivas dos veículos aos níveis de vibração medidos em três pontos de interface entre o condutor / veículo. Para isso também, foi utilizado o método estatístico de regressão múltipla linear. Na segunda parte (6.3.2.2), foram investigadas possíveis influências do comportamento acústico do veículo sobre o conforto vibracional, também foram elaboradas equações de conforto denominadas por ICV* relacionando as notas subjetivas de vibração com dois parâmetros acústicos.

6.3.2.1 Descrição por dados vibracionais

De forma análoga ao desenvolvimento para as equações dos índices de conforto acústico, os ICV's foram calculados para cada condição de prova e também para a avaliação global, utilizando, nesse último caso, valores objetivos obtidos a partir das médias de todos os trechos. Para cada uma das quatro condições avaliadas foi obtido apenas um modelo de regressão de acordo com as considerações estatísticas necessárias.

Na TAB. 6.15 são apresentados os valores de vibração no volante, na alavanca de câmbio e pavimento (pedana), as notas subjetivas e a denominação das variáveis consideradas.

TABELA 6.13 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Calçamento

CALÇAMENTO				
Variável	Y	X ₁	X ₂	X ₃
Veículo	Nota	RMS Corona (m/s ²)	RMS Alavanca de câmbio (m/s ²)	RMS Pedana (m/s ²)
A	4,09	9,08	4,69	2,12
B	4,36	11,11	2,68	2,06
C	5,00	5,34	5,92	2,02
D	5,27	5,74	5,59	1,71
E	4,18	9,44	6,33	2,78

Para o trecho de calçamento o índice de conforto é descrito de forma linear apenas pelo parâmetro de vibração no volante (VC), o que é diretamente compatível com a principal reclamação nesse percurso. Observa-se, porém, um coeficiente de determinação em torno de 72,5%, o que indica que aproximadamente 27,5% da variação das notas atribuídas são devidas a outros parâmetros distintos daqueles que foram mensurados, tudo isso com uma significância de 6,7% (TAB.6.16).

TABELA 6.14 – Modelo 01 de regressão linear simples para o trecho de calçamento – Variável X1

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,851339936
R-Quadrado	0,724779686
R-quadrado ajustado	0,633039582
Erro padrão	0,317814183
Observações	5

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,797982435	0,797982435	7,900358185	0,067250565
Resíduo	3	0,303017565	0,101005855		
Total	4	1,101			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	6,034808102	0,536745928	11,2433235	0,001508534	4,326643007	7,742973196
RMS Corona (m/s2)	-0,178679452	0,063569855	-2,81075758	0,067250565	-0,380987103	0,023628198

A EQUAÇÃO de $ICV_{\text{calçamento}}$ é apresentada em (6.9 a e b).

$$ICV_{\text{Calçamento}} = -0,18VC + 6,03 \quad (6.9 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICV'_{\text{Calçamento}} = -0,85VC \quad (6.9 - b)$$

A TAB. 6.17 apresenta os valores mensurados e avaliados para o trecho de estrada.

TABELA 6.15 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Estrada

ESTRADA				
Variável	Y	X ₁	X ₂	X ₃
Veículo	Nota	RMS Corona (m/s ²)	RMS Alavanca de câmbio (m/s ²)	RMS Pedana (m/s ²)
A	4,79	2,64	3,28	1,28
B	4,79	3,24	1,95	1,16
C	5,30	1,83	3,00	1,41
D	5,36	2,44	5,43	0,89
E	4,33	3,01	8,09	4,51

O ICV para o trecho de estrada foi determinado pela vibração no volante e pavimento, sendo coerente por serem considerados como os pontos de interface mais expostos ao contato do usuário em trecho de estrada (TAB. 6.18). Outra vez, o coeficiente de determinação encontrado para o modelo sugere que aproximadamente 25% da variação das notas são devidas a outros parâmetros não contemplados, agravando nesse caso, um valor de significância muito elevando em torno de 12,5%. A EQUAÇÃO de conforto para esse trecho é apresentada em (6.10 a e b).

TABELA 6.16 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de estrada – Variáveis X1X3

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,93569023
R-Quadrado	0,875516206
R-quadrado ajustado	0,751032411
Erro padrão	0,211652399
Observações	5

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	0,630126524	0,315063262	7,033174164	0,124483794
Resíduo	2	0,089593476	0,044796738		
Total	4	0,71972			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	6,329696606	0,518661693	12,20390226	0,006647453	4,098075457	8,561317754
RMS Corona (m/s ²)	-0,419175031	0,205577143	-2,03901574	0,17829607	-1,303702086	0,465352025
RMS Pedana (m/s ²)	-0,16956226	0,075148573	-2,25636036	0,152675517	-0,492900471	0,153775951

$$ICV_{\text{estrada}} = -0,42VC - 0,170VP + 6,33 \quad (6.10 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICV'_{\text{estrada}} = -0,54VC - 0,60VP + 8,90 \times 10^{-16} \quad (6.10 - b)$$

Na qual:

VC: é a vibração no volante (posição superior – coroa)

VP: é a vibração no pavimento lado motorista (piso)

As TAB. 6.19 e 6.20 apresentam os parâmetros e resultados para o ICV_{urbano} . Nesse trecho o índice é descrito pela vibração no volante e alavanca de câmbio, também coerente com o tempo de exposição do usuário a essas interfaces. Entretanto, a qualidade do modelo encontrada é significativamente superior quando comparada aos demais trechos. O modelo apresenta um coeficiente de determinação em torno de 99% com uma significância de aproximadamente 0,5%. A EQUAÇÃO para o ICV é apresentada em (6.11 a e b).

TABELA 6.17 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Urbano

URBANO				
Variável	Y	X ₁	X ₂	X ₃
Veículo	Nota	RMS Corona (m/s ²)	RMS Alavanca de câmbio (m/s ²)	RMS Pedana (m/s ²)
A	4,91	1,71	2,32	0,68
B	5,15	1,83	1,56	0,64
C	5,39	1,09	2,18	0,61
D	5,18	0,94	3,22	0,44
E	4,15	1,66	5,21	0,82

TABELA 6.18 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de urbano – Variáveis X1X2

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,997525386
R-Quadrado	0,995056896
R-quadrado ajustado	0,990113791
Erro padrão	0,047889484
Observações	5

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	0,923333195	0,461666597	201,3020248	0,004943104
Resíduo	2	0,004586805	0,002293403		
Total	4	0,92792			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	6,71497456	0,103215194	65,05800455	0,000236181	6,270875424	7,159073696
RMS Corona (m/s ²)	-0,625439729	0,059865344	-10,4474423	0,009037769	-0,883019516	-0,367859942
RMS Alavanca de câmbio	-0,295626802	0,016856044	-17,538326	0,003235282	-0,368152507	-0,223101096

$$ICV_{urbano} = -0,63VC - 0,30VAC + 6,71 \quad (6.11 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICV'_{urbano} = -0,52VC - 0,87VAC - 8,72 \times 10^{-16} \quad (6.11 - b)$$

Na qual:

VAC: é a vibração na alavanca de câmbio

Por último o modelo global para ICV é apresentado nas TAB. 6.21 e 6.22. O índice para essa condição é descrito pela vibração no volante e pavimento, com a mesma ressalva sobre a qualidade do modelo. Embora ligeiramente melhor do que aquela encontrada para os trechos de calçamento e estrada, o coeficiente de determinação ficou em torno de 83,6%, com uma significância em torno de 8,2%. A EQUAÇÃO para ICV_{global} é descrita em (6.12 a e b).

TABELA 6.19 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Circuito Global

GLOBAL				
Variável	Y	X ₁	X ₂	X ₃
Veiculo	Nota	RMS Corona (m/s ²)	RMS Alavanca de câmbio (m/s ²)	RMS Pedana (m/s ²)
A	4,64	4,02	3,39	1,34
B	4,82	4,86	1,89	1,26
C	5,45	2,52	3,50	1,36
D	5,39	3,07	4,92	0,98
E	4,12	4,28	8,08	3,15

TABELA 6.20 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o circuito global – Variáveis X1X3

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,958201985
R-Quadrado	0,918151043
R-quadrado ajustado	0,836302087
Erro padrão	0,223785841
Observações	5

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	1,123559795	0,561779897	11,21762672	0,081848957
Resíduo	2	0,100160205	0,050080103		
Total	4	1,22372			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	6,734866962	0,460291298	14,63174949	0,0046385	4,754393353	8,71534057
RMS Corona (m/s ²)	-0,324210595	0,125889749	-2,57535342	0,123463671	-0,865870467	0,217449276
RMS Pedana (m/s ²)	-0,393401925	0,136003671	-2,89258314	0,101623213	-0,978578491	0,191774641

$$ICV_{global} = -0,32VC - 0,39VP + 6,73 \quad (6.12 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICV'_{global} = -0,55VC - 0,62VP - 5,38 \times 10^{-16} \quad (6.12 - b)$$

6.3.2.2 Descrição por dados acústicos

Buscando evidenciar uma possível influência do comportamento acústico dos veículos na avaliação vibracional, foram escolhidos dois parâmetros acústicos para tentar explicar a variação das notas vibracionais. Os parâmetros selecionados foram o nível de ruído, por traduzir a amplitude do ruído e sua relevante aplicabilidade, e a curtose. Ressalta-se que a escolha dessa última foi motivada por um cunho investigativo, no qual se pressupõe dentre outras coisas, que a impulsividade de um sinal acústico pode representar também características de um pavimento que por sua vez impactam na avaliação vibracional.

Fazendo-se uma análise geral e única das quatro condições avaliadas: trecho de calçamento, estrada, urbano e global, tem-se os seguintes resultados:

- Os modelos encontrados para os trechos de calçamento e estrada possuem qualidade muito superior em relação àqueles determinados pelas medidas vibracionais (seção 6.3.2.1). Com um valor de $R_{2,aj}(\text{calçamento})=99,8\%$ e significância inferior a 0,1% e $R_{2,aj}(\text{estrada})=88,3\%$ e significância em torno de 1,8%.
- A curtose esteve presente nos dois modelos citados acima, sendo para o trecho de estrada o único parâmetro considerado (equações (6.13) e (6.14)).
- De maneira totalmente contrária aos trechos de calçamento e estrada, o modelo de ICV^* para o trecho urbano descrito por parâmetros acústicos mostrou-se muito inferior aquele obtido com medidas vibracionais. Tem-se para ICV^* um $R_{2,aj}(\text{urbano})=62\%$ e significância de 11,4% contra $R_{2,aj}(\text{estrada})=99\%$ e significância em torno de 0,5% para o modelo de ICV .
- A equação para o ICV^*_{urbano} foi descrita apenas em função da curtose (equação (6.15)). A baixa qualidade do modelo parece indicar que esse parâmetro não é muito adequado para a condição de uso do veículo nesse tipo de trecho. Constantes “paradas”, reduzidas e arrancadas do veículo evidenciam causar um valor de curtose (impulsividades no sinal) que não traduz a percepção de conforto vibracional para essa condição.

- Por último uma equação para ICV^* global é determinada em (6.16) através do único parâmetro curtose. Embora a empregabilidade das equações globais obtidas nesse trabalho deva ser analisada com critério (devido a avaliação diversa dos veículos para cada tipo de trecho), o valor de $R_{2,aj} \text{ (global)}$ e da significância do modelo para o ICV^* são melhores do que aqueles obtidos para o ICV ($R_{2,aj} \text{ (global)}=89,5\%$ e significância de $1,5\%$ contra $R_{2,aj} \text{ (global)}=83,6\%$ e significância em torno de $8,2\%$, respectivamente).
- Todos os resultados comentados acima podem ser visualizados através das TAB. 6.23 a 6.30 e / ou através das EQ. (6.13 a e b) a (6.16 a e b).

TABELA 6.21 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Calçamento

CALÇAMENTO			
Variável	Y	X ₁	X ₂
Veiculo	Nota	Nível de ruído dB(A)	Kurtosis
A	4,09	75,30	2,58
B	4,36	77,60	2,53
C	5,00	76,75	2,72
D	5,27	76,55	2,79
E	4,18	76,95	2,51

TABELA 6.22 – Modelo 01 de regressão linear múltipla para o trecho de calçamento – Variáveis X1X2

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,999606689
R-Quadrado	0,999213532
R-quadrado ajustado	0,998427065
Erro padrão	0,020807461
Observações	5

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	1,100134099	0,55006705	1270,508149	0,000786468
Resíduo	2	0,000865901	0,00043295		
Total	4	1,101			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	-22,15411179	1,01779203	-21,7668356	0,002103958	-26,53331745	-17,77490614
Nível de ruído dB(A)	0,203849781	0,012512551	16,29162464	0,003746496	0,15001262	0,257686941
Kurtosis	4,233563089	0,085271563	49,6480063	0,000405445	3,866669166	4,600457011

$$ICV^*_{calçamento} = 0,20NR + 4,23K - 22,15 \quad (6.13 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICV^{*'}_{calçamento} = 0,33NR + 0,10K + 2,12 \times 10^{-15} \quad (6.13 - b)$$

TABELA 6.23 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Estrada

ESTRADA			
Variável	Y	X ₁	X ₂
Veiculo	Nota	Nível de ruído dB(A)	Kurtosis
A	4,79	70,63	2,67
B	4,79	70,37	2,62
C	5,30	70,16	2,71
D	5,36	72,01	2,83
E	4,33	71,76	2,44

TABELA 6.24 – Modelo 01 de regressão linear simples para o trecho de estrada – Variável X2

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,939630654
R-Quadrado	0,882905767
R-quadrado ajustado	0,843874356
Erro padrão	0,167605749
Observações	5

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,635444939	0,635444939	22,62039068	0,017643563
Resíduo	3	0,084275061	0,028091687		
Total	4	0,71972			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	-2,504928677	1,561679689	-1,60399645	0,207051431	-7,474890434	2,46503308
Kurtosis	2,795376291	0,587746737	4,756089852	0,017643563	0,92490386	4,665848722

$$ICV^*_{estrada} = 2,80K - 2,50 \quad (6.14 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICV^{*'}_{estrada} = 0,94K \quad (6.14 - b)$$

TABELA 6.25 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Urbano

URBANO			
Variável	Y	X ₁	X ₂
Veiculo	Nota	Nível de ruído dB(A)	Kurtosis
A	4,91	66,43	2,55
B	5,15	64,34	2,67
C	5,39	63,51	2,65
D	5,18	65,64	2,71
E	4,15	65,49	2,53

TABELA 6.26 – Modelo 01 de regressão linear simples para o trecho urbano – Variável X2

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,787172953
R-Quadrado	0,619641258
R-quadrado ajustado	0,492855011
Erro padrão	0,342997805
Observações	5

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,574977516	0,574977516	4,887290788	0,11402481
Resíduo	3	0,352942484	0,117647495		
Total	4	0,92792			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	-7,75127451	5,750067064	-1,34803202	0,2703997	-26,05055419	10,54800517
Kurtosis	4,846405229	2,192227567	2,21072178	0,11402481	-2,130241291	11,82305175

$$ICV^*_{urbano} = 4,85K - 7,75 \quad (6.15 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICV^{*'}_{urbano} = 0,79K \quad (6.15 - b)$$

TABELA 6.27 – Parâmetros subjetivos e objetivos x variáveis do modelo de regressão – Circuito Global

GLOBAL			
Variável	Y	X ₁	X ₂
Veiculo	Nota	Nível de ruído dB(A)	Kurtosis
A	4,64	72,20	2,60
B	4,82	73,75	2,61
C	5,45	73,01	2,69
D	5,39	73,34	2,78
E	4,12	73,56	2,49

TABELA 6.28 – Modelo 01 de regressão linear simples para o circuito global – Variáveis X2

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,946125972
R-Quadrado	0,895154355
R-quadrado ajustado	0,860205807
Erro padrão	0,206802412
Observações	5

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	1,095418288	1,095418288	25,61349183	0,014888879
Resíduo	3	0,128301712	0,042767237		
Total	4	1,22372			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	-8,012971882	2,549994157	-3,14234911	0,051569643	-16,12819136	0,1022476
Kurtosis	4,89696439	0,967592629	5,06097736	0,014888879	1,817652802	7,976275978

$$ICV^*_{global} = 4,90K - 8,01 \quad (6.16 - a)$$

Ou (com os coeficientes normalizados)

$$ICV^*_{global} = 0,95K \quad (6.16 - b)$$

6.3.3 – Índice de conforto acústico em condições de testes padronizados

O objetivo principal dessa seção é o de verificar se as equações ou modelos determinados para os índices de conforto acústico ICA são aplicáveis para as condições de testes padronizados, nos quais regime de operação e manobras é normatizado, bem como o tipo de pavimento da pista utilizada (NORMA FIAT 7R-3000, 2004).

Conforme descrito no capítulo 4, foram realizadas provas em pistas padronizadas (asfalto liso e áspero) e em câmara acústica. A análise realizada consistiu em verificar a aplicabilidade de todas as equações de ICA determinadas (em um total de 8) em todas as condições de teste padronizados que foram realizadas (em um total de 71).

Observou-se que a não ser por alguns conjuntos de resultados, os índices obtidos para os testes em condições padronizadas diferem daqueles obtidos em ensaios realizados em vias de trânsito convencionais. Os resultados encontrados mostram que existe uma necessidade de adequação dos procedimentos e condições dos testes padronizados para melhor representar aqueles realizados em vias de trânsito convencionais. De forma geral, alguns destes resultados são comentados abaixo:

- Nos testes realizados em asfalto áspero e câmara acústica não foi verificada nenhuma correspondência entre o comportamento dos veículos e todos os ICA's calculados.
- Na prova de aceleração lenta em quinta marcha (TAB. 6.31) foi encontrado um índice correspondente a 3ª equação de ICA para o trecho de calçamento. Embora a aplicabilidade da equação tenha correspondido a uma mesma avaliação subjetiva, essa condição será desconsiderada uma vez que uma aceleração lenta em 5ª marcha em asfalto liso não indica ter nenhuma coerência verdadeira com uma avaliação realizada em trecho de calçamento.
- Decisão análoga é realizada para a correspondência encontrada entre a prova de aceleração veloz em 2ª marcha em asfalto liso com a 1ª equação de ICA para calçamento, desconsiderando esse resultado (TAB. 6.32).
- Em seguida foram encontradas correspondências entre a equação de ICA para estrada com as provas padronizadas em velocidade constante de 70 e 90 km/h em asfalto liso (TAB. 6.33 e 6.34). Tal resultado pode parecer viável, uma vez que as condições de teste se assemelham às encontradas no experimento em circuito.

- Por último foi verificada a correspondência da 1ª equação de ICA para trecho urbano com a condição de teste em marcha lenta com o motor ligado (TAB. 6.35). Essa condição é coerente com a avaliação realizada em trecho urbano. Entretanto, vale aqui ressaltar que os demais índices encontrados para esse trecho $ICA_{2-urbano}$ e $ICA_{3-urbano}$ não apresentaram correspondência com essa condição de prova, o que sugere que as diferentes métricas e seus respectivos pesos estabelecidos em cada equação podem não traduzir o real conforto percebido.

TABELA 6.29 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado de aceleração lenta em 5ª marcha

Prova padronizada asfalto liso - AL5							
Veículo	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (asper)	Fluctuation Strength (vacil)	Kurtosis -	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	25,70	1,73	1,17	0,0032	2,3400	68,80	69,30
B	23,50	1,54	1,09	0,0072	2,4700	72,90	69,70
C	23,30	1,78	1,18	0,0050	2,5800	68,90	69,90
D	22,90	1,62	1,12	0,0064	2,6800	72,40	70,40
E	27,10	1,81	1,20	0,0057	2,3700	65,50	71,30

EQUAÇÃO (6.3) correspondente ao teste padronizado – AL5 em asfalto liso:

$$ICA_{3-calçamento} = 3,42S + 3,59K - 9,61 \quad (6.3)$$

TABELA 6.30 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado de aceleração veloz em 2ª marcha

Prova padronizada asfalto liso - AV2							
Veículo	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (asper)	Fluctuation Strength (vacil)	Kurtosis -	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	26,50	1,66	1,23	0,0196	2,4800	68,30	73,10
B	22,40	1,27	1,06	0,0227	2,4700	77,30	71,50
C	22,20	1,36	1,04	0,0294	2,5200	78,90	70,70
D	22,00	1,36	0,95	0,0312	2,6800	79,30	72,00
E	26,80	1,71	1,29	0,0373	2,4500	65,70	72,10

EQUAÇÃO (6.1) correspondente ao teste padronizado – AV2 em asfalto liso:

$$ICA_{1-\text{calçamento}} = 148,1FS + 0,13IA + 0,16NR - 19,81 \quad (6.1)$$

TABELA 6.31 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado em velocidade constante a 70km/h

Prova padronizada asfalto liso - VC 70 Km/h							
Veículo	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (asper)	Fluctuation Strength (vacil)	Kurtosis -	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	20,50	1,59	1,13	0,0123	2,4900	73,70	66,00
B	19,50	1,39	0,92	0,0094	2,6000	83,60	65,90
C	18,20	1,49	0,99	0,0113	2,4200	81,20	64,30
D	17,90	1,30	0,94	0,0110	2,5100	84,90	65,10
E	21,20	1,57	1,05	0,0113	2,4800	76,80	66,10

EQUAÇÃO (6.4) correspondente ao teste padronizado – VC 70km/h em asfalto liso:

$$ICA_{\text{estrada}} = 5,16R - 8,69S - 0,37NR + 31,23 \quad (6.4)$$

TABELA 6.32 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado em velocidade constante a 90km/h

Prova padronizada asfalto liso - VC 90 Km/h							
Veículo	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (asper)	Fluctuation Strength (vacil)	Kurtosis -	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	26,10	2,08	1,37	0,0095	2,4500	56,50	69,90
B	24,00	1,67	1,07	0,0106	2,5800	73,00	68,70
C	23,60	1,88	1,15	0,0108	2,5500	68,90	68,00
D	21,70	1,55	1,13	0,0077	2,6600	73,50	67,70
E	26,10	1,95	1,22	0,0088	2,6100	62,70	69,30

EQUAÇÃO (6.4) correspondente ao teste padronizado – VC 90km/h em asfalto liso:

$$ICA_{\text{estrada}} = 5,16R - 8,69S - 0,37NR + 31,23 \quad (6.4)$$

TABELA 6.33 – Parâmetros acústicos medidos e calculados em teste padronizado em marcha lenta com o motor a quente

Medidas ML Quente							
Veículo	Loudness (sone)	Roughness (asper)	Sharpness (asper)	Fluctuation Strength (vacil)	Kurtosis -	Índice de Articulação (%)	Nível de ruído dB(A)
A	7,03	0,12	0,83	0,0049	1,7000	99,50	50,00
B	4,15	0,12	0,79	0,0207	2,1000	99,20	44,00
C	3,44	0,06	0,99	0,0041	1,6500	99,80	40,90
D	4,18	0,16	0,73	0,0042	2,1800	99,10	44,30
E	4,68	0,07	0,98	0,0049	1,6300	99,70	44,20

EQUAÇÃO (6.5) correspondente ao teste padronizado – ML(marcha lenta) motor quente:

$$ICA_{1-urbano} = -3,55R + 20,08FS - 0,23NR + 22,37 \quad (6.5)$$

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES

7.1 – Conclusões finais

Como resultado de maior importância para este trabalho foi possível verificar-se e confirmar-se que a premissa básica suposta que as medidas convencionais de engenharia, tradicionalmente utilizadas pelo setor automotivo, são insuficientes para caracterização do conforto acústico veicular. Valores objetivos de nível de ruído e índice de articulação, parâmetros usuais para caracterização de veículos, mostram-se ineficientes para diferenciação do conforto acústico percebido pelos avaliadores.

No desenvolvimento de uma metodologia de avaliação consistente, que correlacionasse dados subjetivos e parâmetros objetivos apropriados, buscando a determinação de possíveis índices descritores de conforto, foram necessárias diversas análises e considerações sobre cada uma dessas três partes, a destacar:

- Sobre os dados subjetivos:

A amostra de avaliadores foi composta por um público de características relativamente homogêneas, o que do ponto de vista estatístico pode comprometer a representatividade de uma população real. Em contrapartida, tratou-se de uma amostra experiente (tempo de habilitação e conhecimento veicular) e com expectativas de clientes condizentes com segmento automotivo dos veículos avaliados. Acredita-se que essa característica tenha contribuído para o estudo, uma vez que o objetivo principal era a avaliação sensorial dos participantes ou invés apenas do julgamento de preferência. A hipótese de que um público técnico, com conhecimento veicular e também na área de NVH, fosse influenciar no resultado foi rejeitada, uma vez que estatisticamente não houve diferenças significativas entre as notas atribuídas por esses dois tipos de público.

De acordo com o questionário respondido o conforto acústico apresentou maior grau de relevância sobre o vibracional. Apenas 11% dos avaliadores indicaram esses dois tipos de conforto com uma nota máxima de importância. O atributo para a compra de um veículo

indicado como o mais importante foi o de conforto. Entretanto, acredita-se que a amplitude desse atributo é mais devido ao conforto ergonômico, visual, térmico ou outros, do que o acústico ou vibracional. Essa suposição é baseada na indicação final de preferência de compra entre todos os modelos avaliados. O veículo indicado como 3º melhor em conforto acústico, teve índices de preferência de compra muito próximos ao melhor veículo avaliado, considerando que apenas esses dois juntos apresentaram 87% da preferência.

O mesmo não pode ser afirmado quanto ao critério de exclusão para compra. Nesse caso, também em torno de 87% dos veículos não escolhidos para compra referem-se diretamente aos dois veículos que obtiveram a pior avaliação acústica e vibracional.

Em todas as condições de prova avaliadas ruídos tipo “grilos” foram indicados com um dos principais incômodos, com uma frequência de certa forma similar para todos os veículos. Talvez isso explique, a razão pela qual, apesar do elevado índice de reclamação, esse tipo de ruído parece não ter impactado diretamente na avaliação subjetiva dos veículos. Um comportamento similar pôde ser verificado também para ruídos de “rotação” ou suspensão.

De forma contrária, vale ressaltar que os ruídos provenientes do funcionamento do motor e acessórios, indicados como um dos principais incômodos em estrada e trecho urbano, apresentaram uma relação direta com as notas atribuídas para cada veículo.

- Sobre os parâmetros objetivos:

A escolha dos parâmetros objetivos utilizados nesse estudo partiu de uma premissa básica de que o objetivo principal não seria apenas relacionar avaliações subjetivas com métricas psicoacústicas e sim o de verificar também como outros parâmetros medidos ou calculados se comportavam como descritores para o conforto acústico percebido. A partir disso, além das métricas psicoacústicas mais empregadas como “loudness”, “roughness”, “sharpness” e “fluctuation strength”, foram escolhidos o parâmetro medido de nível de ruído (pressão sonora) pela sua aplicabilidade e referência, além dos parâmetros calculados índice de articulação, também esse devido a sua frequente utilização no meio automobilístico, e curtose que apesar de ser um parâmetro essencialmente estatístico, a escassa literatura encontrada despertou o interesse sobre a sua possível potencialidade dentro desse estudo.

No decorrer do trabalho, observou-se que o parâmetro “loudness” e nível de ruído apresentaram-se como variáveis colineares nos modelos de regressão, justificando o motivo pelo qual o “loudness” foi suprimido de todas as equações obtidas. Em uma análise posterior, seria interessante verificar se alguma dessas duas variáveis apresenta vantagem para aplicação em estudos dessa natureza.

- Sobre a determinação de índices de conforto:

De forma geral, para a determinação dos ICA's apesar dos modelos terem apresentado boa qualidade sobre o ponto de vista estatístico, cabe ressaltar que o tamanho reduzido da amostra é por si só um fator limitante para a validação dos índices para outras diferentes condições de avaliação.

Para algumas condições de teste foram obtidos até três modelos de regressão, os quais apesar de serem viáveis estatisticamente, demonstram em um primeiro momento, a não indicação de um único conjunto de parâmetros adequados para a descrição do conforto acústico. Sobre essa observação, porém, cabem algumas ressalvas a mencionar:

Apesar do trecho de calçamento apresentar três modelos para ICA, o terceiro (ICA_{3-calçamento}) parece indicar uma melhor aplicabilidade, uma vez que é definido pelos parâmetros de “sharpness” e curtose, respectivamente considerados como bons descritores para ruídos tipo “grilos” e para impulsividade do sinal predominante existentes nesse tipo de trecho. Os outros dois modelos calculados apresentam dois parâmetros em comum (nível de ruído e “fluctuation strength”) e como parâmetro de diferenciação o índice de articulação em ICA₁ e “roughness” em ICA₂. Aqui duas críticas são consideradas sobre esses modelos: o índice de articulação não se apresenta como um bom parâmetro para esse tipo de trecho uma vez que o seu cálculo é extremamente sensível a impulsividades do sinal (picos de ruído geram uma queda pontual drástica no IA); um dos parâmetros em comum entre esses dois modelos é o nível de pressão sonora, o que como premissa básica desse trabalho não retrata informações suficientes para caracterização ou diferenciação do conforto entre veículos.

Para o trecho de estrada o único modelo calculado apresentou como descritores os parâmetros “roughness”, “sharpness” e nível de ruído, devendo esses, de acordo com as análises já

apresentadas, representar principalmente os ruídos provenientes do motor e acessórios. Esse cenário parece indicar certa coerência entre o modelo e a prática, uma vez que os atributos de amplitude e aspereza são normalmente utilizados no âmbito automobilístico para caracterizar o ruído de motores. Ainda sobre a determinação de índices de conforto para esse tipo de trecho, vale ressaltar que duas condições de prova padronizadas, nas quais os veículo foram avaliados em velocidades constantes a 70 e 90km/h em asfalto liso, mostraram correspondência com o modelo encontrado. Em outras palavras, quando ICA_{estrada} foi aplicado para os dados coletados nessas duas condições de provas, os resultados encontrados foram condizentes com a avaliação subjetiva realizada.

Para o trecho urbano, novamente foram determinados três modelos para ICA. Pode-se dizer que o $ICA_{3\text{-urbano}}$ é uma simplificação do $ICA_{2\text{-urbano}}$, uma vez que a única diferença entre esses em termos de parâmetros é a exclusão do “fluctuation strength”. Dessa forma, verifica-se viável a desconsideração do segundo modelo, uma vez que essa variável de diferenciação parece não acrescentar muita explicação à variável dependente. O outro modelo apresentado como $ICA_{1\text{-urbano}}$ é composto pelos parâmetros “roughness”, “fluctuation strength” e nível de ruído. O que parece poder afirmar sobre essa equação é que a mesma obteve correspondência com medições objetivas de ruído para os veículos em marcha lenta com motor a quente (condição típica para esse trecho). Como correspondência entende-se que a equação encontrada em $ICA_{1\text{-urbano}}$ pôde ser aplicada nesse tipo de avaliação padronizada, traduzindo a mesma percepção de conforto avaliada subjetivamente. Entretanto, fica a necessidade de se entender a real influência e/ou aplicabilidade de dois modelos compostos de parâmetros acústicos distintos entre si. Talvez o primeiro modelo seja mais adequado para avaliação nas condições em que o veículo permanece parado (semáforos, cruzamentos, tráfego, etc.) e o terceiro modelo seja mais representativo do comportamento dinâmico nesse tipo de trecho (arrancadas, velocidades mais baixas, etc.). Contudo, para essa verificação análises complementares se fazem necessárias.

Para a avaliação subjetiva atribuída no final de todo o percurso, o que se pôde observar é que apesar de ter sido encontrado um modelo de ICA_{global} para descrever a correlação dessas notas com os dados objetivos médios de todo o circuito, não parece pertinente generalizar uma única metodologia de avaliação para todos os tipos de trechos. As avaliações subjetivas e os próprios parâmetros objetivos são muito diferentes para cada condição, tendo-se como exemplo que um dos veículos percebido como o 2º pior em conforto acústico para trecho de

estrada e urbano obteve a melhor avaliação em calçamento, com uma diferença considerável em relação aos demais.

Como resultados complementares desse estudo, explorados inicialmente com o principal intuito de verificar uma possível influência entre as percepções de conforto acústico e vibracional, foi observado, que salvo em condições específicas, os três melhores veículos avaliados e os dois piores foram os mesmos para os dois tipos de conforto.

Qualitativamente foi verificado que o incômodo vibracional percebido pelos avaliadores em todas as condições de prova com índices de reclamação relevantes foi a vibração no volante, mostrando evidência de ter contribuído diretamente com as notas atribuídas aos veículos.

Outros incômodos vibracionais, como trepidação devido ao pavimento e vibração de retrovisores parecem não ter impactado diretamente sobre a avaliação dos veículos, apesar de terem aparecido com índices de reclamações significativos.

O veículo D foi classificado com o melhor conforto vibracional em praticamente todas as condições avaliadas. Já na avaliação acústica, sua classificação só foi dada como a melhor no trecho de calçamento, aparecendo nos demais trechos como mediano ou segundo pior veículo. Esse comportamento pode sugerir que o bom desempenho vibracional pode ter influenciado na avaliação acústica no trecho de calçamento. Além disso, nesse mesmo trecho, os principais ruídos reclamados não explicaram as notas subjetivas, podendo supor que alguma outra característica fosse responsável pelo seu bom desempenho acústico.

Nos índices de conforto vibracional (ICV's) determinados para se conhecer os fatores mais influentes na percepção do conforto, observou-se uma baixa qualidade do ponto de vista estatístico para todas as condições exceto para trecho urbano. No que se refere aos parâmetros abordados em cada modelo, considerando o tempo de exposição de contato na interface usuário/veículo em cada condição de teste, os resultados mostraram bastante coerência. Em outras palavras, verificou no $ICV_{\text{calçamento}}$ como parâmetro descritor a vibração no volante, no ICV_{estrada} os parâmetros de vibração volante e pavimento e no ICV_{urbano} os parâmetros de vibração no volante e alavanca de câmbio.

Os modelos de ICV^{**} s calculados a partir da correlação de dados subjetivos e parâmetros acústicos objetivos, apresentou interessantes resultados tanto do ponto de vista estatístico como da própria correlação com os parâmetros considerados. Estatisticamente todos os modelos, exceto o urbano, obtiveram qualidade significativamente superior tanto como explicação para notas subjetivas como pela própria significância dos resultados. Entretanto, sem dúvida alguma a característica mais importante desses modelos foi a aplicabilidade do parâmetro curtose. Nos trechos de estrada e global essa variável foi apresentada como o único parâmetro descritor. No modelo para o calçamento, apesar da menor contribuição, também esteve presente em conjunto com o nível de ruído. Pelos resultados expostos, nesses três trechos, os parâmetros de sinais acústicos, em especial a curtose, apresentaram-se melhores descritores da avaliação subjetiva do que os próprios níveis de vibração observados nos veículos. De uma forma generalista, parece que a impulsividade percebida no sinal acústico causou uma provável influência na percepção de vibração. No caso do trecho urbano, no qual a curtose apresentou comportamento contrário, parece coerente também esse resultado, uma vez que a impulsividade aqui do sinal acústico não é condicionada a um regime aproximadamente constante, e sim com uma condição de operação do veículo altamente transiente com “paradas”, arrancadas, freqüentes reduções de marcha, etc.

De forma geral, conclui-se certa viabilidade e pertinência nos estudos de correlação entre dados subjetivos, métricas de psicoacústica e outros parâmetros acústicos objetivos. Os resultados encontrados apontam para uma real correlação existente entre alguns ou vários desses parâmetros. Análises complementares demonstraram também haver certa influência entre as percepções de conforto acústico e vibracional.

A metodologia desenvolvida para avaliação mostrou-se satisfatória, sendo necessária, porém sua validação através dos resultados objetivos encontrados. Novos estudos devem ser conduzidos considerando, dentre outros, uma amostra maior, tanto no que refere ao número de veículos avaliados, quanto à representativa dos avaliadores sobre uma população real. Faz-se necessária também uma avaliação sobre as condições dos trechos avaliados e possíveis condições de testes padronizados buscando uma validação e aplicabilidade da metodologia em novos desenvolvimentos.

As métricas de psicoacústica utilizadas, excetuando pelo “loudness” por motivos já discutidos, se mostraram pertinentes para descrição do conforto. Em diversos modelos,

aparecem com modestas parcelas de contribuição, mas parcelas essas que podem ser justamente o diferencial, por exemplo, entre veículos com níveis de pressão sonora similares. Esse resultado, porém, não descarta a necessidade de ampliar o universo de métricas estudadas e até mesmo o de buscar uma correlação dessas com outras características espectrais dos sinais medidos. Mostrou-se interessante também, continuar explorando a aplicabilidade do parâmetro curtose, que nesse estudo se apresentou como um potencial descritor tanto para o conforto acústico como o vibracional.

Em relação aos índices de conforto acústico determinados, apesar de apresentarem com certo potencial para avaliação comparativa entre veículos, demonstram certa fragilidade em termos de resultado principalmente no que se refere aos trechos de calçamento e urbano. Para esse caso, parece interessante desenvolver outros tipos de avaliação, talvez buscando uma padronização de testes nesses trechos (manobras e regime de funcionamento do veículo), para posterior validação dos índices. Já para utilização desses índices como parâmetros ou metas no desenvolvimento de novos projetos, faz-se oportuno extrapolar ou ampliar a pesquisa, visto que o universo de apenas cinco veículos de um único segmento automotivo pode ser considerado demasiadamente limitado.

7.2 – Recomendações para trabalhos futuros

A definição de uma metodologia para avaliação e determinação de índices de conforto acústico veicular ao envolver inúmeros parâmetros, tais como, o uso consistente de dados subjetivos, objetivos, bem como métricas de psicoacústica, oferece várias possibilidades para estudos futuros, visando, sobretudo, sua maior aplicabilidade, sobretudo no desenvolvimento de novos projetos. Como potenciais trabalhos recomendam-se então:

- Verificar a influência de outras métricas psicoacústicas e até mesmo buscar uma correlação dessas com outras características espectrais dos sinais medidos;
- Aumentar o universo de veículos avaliados e segmentos automotivos, do ponto de vista estatístico essa condição é essencial;
- Conduzir novos estudos explorando a existência de um modelo consistente que represente as condições específicas em um trecho urbano (regime estacionário e transitório);

- Conduzir novos testes com uma amostra de avaliadores mais representativa, com um tamanho adequado para cada grupo estratificado;
- Explorar a aplicabilidade do parâmetro curtose como descritor da percepção de conforto, verificando também seu comportamento quando calculado para outros tipos de sinais, como o vibracional, por exemplo;
- Correlacionar as avaliações subjetivas, bem como os parâmetros descritores dos índices de conforto, aos parâmetros de desempenho vibroacústico dos veículos (transmissão aérea, estrutural, comportamento das fontes de ruído e vibração, etc.).
- Verificar a influência de outros tipos de conforto na percepção acústica. Isto poderia ser feito com a validação da metodologia de avaliação subjetiva a partir de técnica de audição (reprodução em fones de ouvido de gravações realizadas em sistema de aquisição binaural);
- Buscar uma melhor adequação das condições de pista padronizadas que possam vir a ser usadas como forma mais representativa dos testes de rua levando eventualmente a uma quase que total substituição dos últimos por procedimentos menos onerosos e mais rápidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ALLMAN-WARD, M.; WILLIAM, R.; DUNNEC, G.; JENNINGS, P. The evaluation of vehicle sound quality using an NVH simulator. The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering – Inter.noise 2004. Prague, Czech Republic, 2004.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12969: Cálculo do índice de articulação em veículos rodoviários automotores. Rio de Janeiro, 1993.7p.
- 3 AURES, W. Berechnungsverfahren fur den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale; Acustica 59; 1985.
- 4 AUWERAER, H. V. d.; WYCKAERT, K.; HENDRICX, W. An engineering approach to sound quality. Symposium on International Automotive Technology - paper series 962491, p.223-232, 1996.
- 5 BAKER S.; JENNINGS P.; DUNNE G.; WILLIAMS, R. Improving the effectiveness of paired comparison tests for automotive sound quality, St. Petersburg, Russia, 2004.
- 6 BAUZER, M. E.; GUIMARÃES, G. P. The Use of Experimental Transfer Path Analysis in a Road Vehicle Prototype Having Independent Sources. SAE technical paper 2008-35-0555, 2008.
- 7 BERANEK, L.; Calculation and measurement of the loudness of sound. Journal of the acoustic society of America; Vol.23; 1951.
- 8 BERGERON, F.; ATRUC, C.; BERRY, A.; MASSON, P.; Sound Quality Assessment of Internal Automotive Road Noise Using Sensory Science. Acta Acustica United with Acustica. Vol.96, p.580-588. Canada, 2010.
- 9 BISTAFA S. R. Acústica aplicada ao controle de ruído. São Paulo. 1ª Ed. Editora Edgard Blucher, 2006.

- 10 BLAUERT, J.; JEKOSCH U. Sound-Quality Evaluation – A Multi-Layered Problem, 1997.
- 11 BLOMMER, M. A.; AMMAN, S. A.; OTTO, N. C. The effect of powertrain sound perceived vehicle performance. SAE Technical paper series 971983, p.891-896, 1997.
- 12 BODDEN, M. Instrumentation for sound quality evaluation. Acta acustica, vol.83, 1997.
- 13 BODDEN, M.; HEINRICHS, R.; LINOW, A. Sound quality evaluation of interior vehicle noise using an efficient psychoacoustic method. Euronoise, 1998.
- 14 BOVENZI, M.; HULSHOF, C. T. J. An updated review of epidemiologic studies on the relationship between exposure to whole-body vibration and low back pain (1986-1997). International Archives Occupational Environmental Health, v. 72, p. 351-365, 1999.
- 15 BRIZON, C.J.S., MEDEIROS, E.B. Improving the acoustic evaluation of motor cars. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics – ICA 2010. PACS: 43.50.LJ,43.66.LJ. Sydney – Austrália, 2010.
- 16 CARVALHO, F. R.; BECKER, M.; FILARDI, J. B. C. Estudo da repetibilidade das características de conforto acústico em ensaios de veículos de passeio em estrada, Society of Automotive Engineers, São Paulo, 2003.
- 17 CERRATO, G. Automotive sound quality, powertrain, road and wind noise. Sound Answers, Inc., Sound & Vibration, April, 2009.
- 18 CHAFFIN, D. B.; ANDERSON, G. B. J.; MARTIN, B. J. Biomecânica Ocupacional. Belo Horizonte. 3a ed. Editora Ergo; 2001.
- 19 CROIX, D. V.; PÉRISSE, J.; ISNARD, N. How to reach utmost efficiency with cabin noise measurements for improving acoustic comfort? IX SIBRAV: Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Paulo, n. 9, Ago. 2007.

- 20 DIRECTIVE 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council, 2002. On the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of workers to the risks Arising From Physical Agents (vibration), 2002.
- 21 FERNANDES, J. C. Notas de aula. Disponível em <http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/acustica-ruídos-primeira-parte.doc>. Acesso em 10 jan 2009.
- 22 FERNANDES, M.; MORATA, T. C. Estudo dos efeitos auditivos e extra-auditivos da exposição ocupacional a ruído e vibração. Revista Brasileira de Otorrinolaringologia, v. 68, n. 5, 2002.
- 23 FIAT, C. R.; Vehicle suspension NVH – Volume 1. Torino, Italy, Edizione 2006.
- 24 FLETCHER, H.; MUNSON, W.A. “Loudness – its definition, measurement and calculations”, J. Acoust. Soc. Am., 5: 82-108, 1933.
- 25 FRY, J.; JENNINGS, P.; WILLIAMS, R.; DUNNE, G. Understanding how customers make their decisions on product sound quality. UK, 2004.
- 26 GENUIT, K.; GLERLICH, H. W. Investigation of the correlation between objective noise measurement and subjective classification. SAE Technical paper 891154, p.295-303, 1989.
- 27 GENUIT, K. Product sound quality oh vehicle noise – A permanent challenge for NVH measurement technologies. SAE Brasil Noise and vibration conference, Florianópolis. SAE Technical paper series 2008-36-0517, Brazil, 2008.
- 28 GERGES, S. N. Y. Ruído: Fundamentos e Controle. 1ª ed. Biblioteca universitária da Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- 29 GERGES, S. N. Y. Ruído e vibrações veiculares. 1ª Ed. NR Editora, Consultoria e Treinamento, Florianópolis, 2005.

- 30 GERGES, S. N. Y.; GOMES, M. A.; LIMA, F. Qualidade sonora de ambientes e produtos. I Seminário de música ciência e tecnologia: Acústica musical. Florianópolis, SC, 2004. Disponível em: http://gsd.ime.usp.br/acmus/publi/textos/06_gerges.pdf. Acesso em 10/09/2010.
- 31 GERGES, S. N. Y.; RIBEIRO, Y. A.; FONSECA, W. D.; Zmijevski, T. R. L. Identificação de fontes de ruído pelo método de beamforming. IX SIBRAV: Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Paulo, n. 9, Ago. 2007.
- 32 GERGES, S. N.Y.; ZMIJEVSKI T.R.L.; JUNIOR, M.T.; LIMA W.J. Qualidade sonora de componentes veiculares. AEA - Congresso psicoacústica. Nov.2003.
- 33 GIACOMIN, J. and FUSTES, F. Subjective Equivalence of Steering Wheel Vibration and Sound, Department of Mechanical Engineering The University of Sheffield. International Journal of Industrial Ergonomics, Volume 35, Issue 6, Pages 517-526, June 2005.
- 34 GIORJÃO, T.; ALBUQUERQUE, E.; CHERMAN, A. Noise sources balancing on vehicle development to improve customer satisfaction. IX SIBRAV: Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Paulo, n. 9, Ago. 2007.
- 35 GOGLIA, V.; GRBAC, I. Whole-body vibration transmitted to the framesaw operator. Applied Ergonomics, v. 36, p. 43-48, 2005.
- 36 GRIFFIN, M. J. Handbook of human vibration. London, Academic Press, 1996.
- 37 GUSKI, R. Psychological methods for evaluation sound quality and assessing acoustic information. Acta acústica, v.83, p.765-774, 1997.
- 38 HEAD ACOUSTICS. Head Application note: Psychoacoustic analyses in Artemis I, 2009.
- 39 HOELDRICH, R.; PFLUEGER, M. A generalized psychoacoustical model of modulation parameters (roughness) for objective vehicle noise quality evaluation. SAE

Noise and Vibration conference and exhibition traverse city; SAE Technical paper series 1999-01-1817; Michigan, 1998.

- 40 ISO 2631/1 – International Organization for Standardization. ISO 2631/1, 1997. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. 2. ed. Geneve: International Organization for Standardization, 1997.
- 41 ISO, 532 Method for calculation loudness level. International Organization for Standardization, 1975.
- 42 JIAN, O.; HONG, L. The effect of vehicle's interior noise on driver's psychological characteristic. INTERNOISE 2003: The 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Seogwipo, Coréia, n. 32, p. 2090-2095, Ago. 2003.
- 43 KANG, K. T.; BYUN, U. S. Sound quality development for passenger vehicle. Internoise noise and sustainability, Lisbon – Portugal, 2010.
- 44 KITUSAMY, N. K.; BUCHHOLZ, B. Whole-body vibration and postural stress among operators of construction equipment: A literature review. Lowell (MA): University of Massachusetts Lowell. Construction Occupational Health Project. <<http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/wvaps.pdf>>. Cited: 27 Abr. 2006.
- 45 LENZUNI, P.; PIERONI, A. Lifetime exposure of bus drivers to shocks and impulsive acceleration. Tenth International Congress on Sound and Vibration; Stockholm Sweden, 2003.
- 46 LEVINE, D. M.; STEPHAN, D.; KREHBIEL, T. C.; BERESON, M. L. Estatística – Teoria e aplicações. 3ª edição, Editora LTC S.A. Rio de Janeiro – Brasil, 2005.
- 47 LINGS, S.; YDE, C. L. Whole-body vibration and low back pain: a systematic, critical review of the epidemiological literature 1992 - 1999. International Archives Occupational Environmental Health, v. 73, p. 290-297, 2000.

- 48 MABBOTT, N.; FOSTER, G.; MCPHEE, B. Heavy vehicle seat vibration and driver fatigue. Sidney: Australian Transport Safety Bureau - Department of Transport and Regional Services, Report No: CR203, 2001.
- 49 MACHADO, Wagner Duarte. Identificação de fontes de ruído externo de um veículo utilizando a técnica de intensidade sonora. 2003. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- 50 MARQUARDT, D. W.; “You should standardize the predictor variables in your regression models” (Discussion of “A critique of some ridge regression methods,” by G. Smith and F. Campbell), *Journal of the American Statistical Association* 75: p.87-91, 1980.
- 51 MARROQUIN, M.; FRAZER, T.; NEWTON Jr., G.; HADDAD, K. In-vehicle panoramic noise source mapping. IX SIBRAV: Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Paulo, n. 9, Ago. 2007.
- 52 MARTNER, O.; ZERBS, C.; FEY, U.; KRAGL, R.; MULLER, A. Neues psychoakustisches Modell zur Bestimmung der Rauigkeit bei Verbrennungsmotoren. *MTZ Motortechnische Zeitschrift* 61 (10), p.2-8, 2000.
- 53 MATTHIAS, S.; MICHAEL, W.; NORBERT, A. Development of vehicle sound quality – Targets and methods. SAE Technical paper 951283, p.401-414, 1995.
- 54 MATSUMOTO, Y.; GRIFFIN, M. J. Nonlinear subjective and biodynamic responses to continuous and transient whole-body vibration in the vertical direction. *Journal of Sound and Vibration*, v. 287, n. 4-5, p. 919-937, 2005.
- 55 MAYNARD, J.D.; WILLIAMS, E. G.; LEE, Y. Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 78, n. 4, p. 1395-1413, Out. 1985.
- 56 MICHAELIS. Dicionário da língua portuguesa, 2009. Disponível em <http://michaelis.uol.com.br/moderno/portugues/>. Acesso em 21/09/2010.

- 57 MIYARA, F. Introducción a la psicoacústica. Publicação interna da Faculdade de Ciências, 2003. Disponível em: <http://analfatecnicos.net/archivos/04.IntroduccionPsicoacusticaFedericoMiyara.pdf>. Acesso em: 10 Ago. 2010.
- 58 MORILLAS, J.M. Barrigón; ESCOBAR, V. Gómez; VÍLCHEZ-GÓMEZ, R.; SIERRA, J.A. Méndez; RÍO, F.J. Carmona Del. Sound Quality in Urban Environments and its relationship with some acoustics parameters; Universidade de Coimbra, Portugal. Acústica 2008 20-22 de outubro, 2008.
- 59 RIBEIRO, R. N. Causas, efeitos e comportameto da economia informal no Brasil. Dissertação de mestrado em Economia do Setor Público – Instituto de Ciência Humanas Departamento de Economia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, Dez. 2000.
- 60 NETER, J.; KUTNER, M.; NACHTSHEIM, C.; WASSERMAN, W. Applied linear statistical models, 4th ed. Homewood, IL: Irwin, 1996.
- 61 NOR, M. J. M.; DEROS, B. M.; DARUIS, D. D. I.; Questionnaire-based survey on drivers' noise and vibration discomfort. ICSV14 – 14th International Congress on Sound & Vibration. Cairns, Austrália. 9-12 July, 2007. 2007
- 62 NOR, M. J. M.; FOULADI, M. H.; NAHVI, H.; ARIFFIN, A. K. Index for vehicle acoustical comfort inside a passenger car. Applied acoustics, 69, p.343-353, 2008.
- 63 NORMA FIAT 7R-3000. Rilievo della rumorosità interna mediante prova su strada. FIAT Auto Normazione, 2004.
- 64 NUNES, Maria Alzira de Araújo. Uma metodologia para quantificação da contribuição sonora de fontes de ruído industrial no meio ambiente. 2006. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- 65 NVH – Fiat Automóveis S.A. Material de divulgação interna da área de Noise, Vibration and Harshness, Engenharia Experimental / Engenharia do Produto da empresa Fiat Automóveis S.A, Belo Horizonte/MG, Brasil.

- 66 ONUSIC, H. A evolução da acústica veicular no Brasil. Revista de Acústica e Vibrações, Florianópolis – SC, n. 28, p. 2-9, Dez. 2001.
- 67 OTTO, N.; AMMAN S.; EATON, C.; LAKE, S. Guidelines for jury evaluations of automotive sounds. Sound and Vibration, p. 1-14, Abr. 2001.
- 68 PALMER, K. T.; GRIFFIN, M. J.; BENDALL, H.; PANETT, B.; COGGON, D. Prevalence and pattern of occupational exposure to whole body vibration in Great Britain: findings from a national Survey. Occupational Environmental Medicine, v. 57, p. 229-236, 2000.
- 69 PAUL, S.; ZMIJEVSKI, T.; GERGES, S. N. Y. Psicoacústica e qualidade sonora. Laboratório de vibrações e acústica – LVA / LARI Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis – Brasil, 2005.
- 70 PFLUEGER, M.; HOELDRICH, R.; BRANDL, F. K.; BIERMAYER, W. Subjective assessment of roughness as a basis for objective vehicle interior noise quality evaluation. SAE Noise and Vibration conference and exposition traverse city; SAE Technical paper series 1999-01-1850 Michigan, 1998.
- 71 PINTO, F. A. N. C. Determinação experimental de parâmetros de sound quality. AEA Congresso psicoacústica, Nov. 2003.
- 72 PINTO, F. C.; JESUS, G. F.; MATTOS, I. A. Understanding psychoacoustic parameters. X Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia da Mobilidade, São Paulo. SAE Technical paper series 2001-01-3943; Brasil, 2001.
- 73 RENZO, B.; BRIZIO, P.; CELIBERTI, L.; FALASCA, V. Objective evaluation of vibroacoustical quality. SAE World Congress Detroit; SAE Technical paper series 2004-01-0405; Michigan, 2004.

- 74 RIBEIRO, L. G. Ergonomia no ambiente construído – um estudo de casos em aeroportos. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Artes e Design. Rio de Janeiro – R.J, 2004.
- 75 ROZESTRATEN, R. J. A. A ergonomia veicular do século XX. Psicologia: Pesquisa & Trânsito, v. 2, nº 1, p. 45-52, Jan./Jun. 2006.
- 76 SANG-KWON, L.; BYUNG-SOO, K.; HEE-CHANG, C.; DONG-CHUL, P.; SEUNG-GYOON, J. Sound quality analysis of a passenger car based on rumbling index. SAE Noise and Vibration conference and exhibition traverse city; SAE Technical paper series 2005-01-2481; Michigan, 2005.
- 77 SANTOS FILHO, P. F.; FERNANDES H.C.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, A. M.; CAMILO, A. J. Avaliação dos níveis de vibração vertical no assento de um trator agrícola de pneus utilizando um sistema de aquisição automática de dados. Revista Arvore, v. 27, n. 6, p. 887-895, 2003.
- 78 SNEE, R. D.; “Some aspects of nonorthogonal data analysis, Part I. Developing Prediction Equations,” Journal of Quality Technology 5: p.67-79, 1973.
- 79 SORAINEN, E.; PENTTINRN, J.; KALLIO, M.; RYTKONEN, E.; TAATTOLA, K. Whole-body vibration of tractor drivers during harrowing. Hygiene Association Journal, v. 59, n. 9, p. 642-644, 1998.
- 80 STEVENS, S. The measurement of loudness. Journal of the acoustic society of America; Vol.27; 1955.
- 81 STEVENS, S. Calculation of the loudness of the complex noise. Journal of the acoustic society of America; Vol.28; 1956.
- 82 STEVENS, S. Procedure for calculation loudness: Mark VI. Journal of the acoustic society of America; Vol.33; 1961.

- 83 STEVENS, S.; VOLKMANN, J. "The relation of pitch to frequency: A revised scale", American Journal of Psychology, 53: 329-353, 1940.

- 84 TERAZAWA, N.; WAKITA, T.; NAKAGAWA, H.; UNO, T. A new method of engine sound design for car interior noise using a psychoacoustic index. SAE World congress Detroit; SAE Technical paper series 2004-01-0406; Michigan, 2004.

- 85 THOMA , G.; BISPING, R. A computerized method for the measurement of speech intelligibility in the car using natural speech sounds. Proceedings Euronoise 98, Munchen, p.532-538, 1998.

- 86 WEISCH, G.; STUCKLSCHWAIGER, W.; MENDONÇA, A. A.; MONTEIRO, N. T. S.; SANTOS, L. A. The creation of a car interior noise quality index for the evaluation of rattle phenomena. SAE Technical paper series 972018, p.1177-1182.

- 87 ZEITLER, A.; ZELLER, P. Psychoacoustic modeling of sound attributes. SAE World congress Detroit; SAE Technical paper series 2006-01-0098; Michigan, 2006.

- 88 ZWICKER, E.; FASTL, H. Psychoacoustics: facts and models. 2a ed. Berlin-Alemanha: Ed. Springer, 1999 (1a ed. 1990). 417 p.

APÊNDICE

Apêndice A

Questionário para avaliação dos veículos:

CONFORTO VIBROACÚSTICO VEICULAR

Antes de iniciar o questionário explique que a avaliação do veículo será feito por nota em uma escala que varia de 1 (péssimo) a 7 (excelente)

SELEÇÃO

1. Sexo do entrevistado:

- ☐ 1. Masculino ☐ 2. Feminino

2. Idade:

- ☐ 1. De 18 a 21 anos ☐ 4. De 36 a 45 anos.
☐ 2. De 22 a 25 anos ☐ 5. De 45 a 60 anos.
☐ 3. De 26 a 35 anos ☐ 6. Mais de 60 anos.

3. Área de atuação profissional: _____

4. Tempo de habilitação:

- ☐ 1. Menos de 1 ano ☐ 3. De 3 a 5 anos.
☐ 2. De 1 a 2 anos ☐ 4. Mais de 5 anos.

5. Qual o veículo que possui (Marca/Modelo e motorização):

6. Com qual frequência utiliza o veículo?

- ☐ 1. Raramente ☐ 4. "3 a 5 vezes por semana(dias úteis)"
☐ 2. Somente fins de semana ☐ 5. Mais de 5 vezes por semana
☐ 3. "1 a duas vezes por semana".

7. Você se sente confortável ao dirigir?

- ☐ 1. Sim ☐ 2. Não

8. Você tem algum problema de audição?

- ☐ 1. Sim ☐ 2. Não

9. O seu problema de audição foi diagnosticado por alguma profissional da área médica (Otorrino, Fonoaudiólogo, Clínico, etc)?

- ☐ 1. Sim ☐ 2. Não

PERFIL

10. Quantas horas você dormiu na última noite, aproximadamente?

- ☐ 1. Até 4 horas ☐ 3. 6 horas ☐ 5. 8 horas
☐ 2. 5 horas ☐ 4. 7 horas ☐ 6. Mais de 8 horas

11. Fez uso de remédio nas ultimas 12 horas?

- ☐ 1. Sim ☐ 2. Não

12. Fez uso de bebida alcoólica nas ultimas 12 horas?

- ☐ 1. Sim ☐ 2. Não

13. Você se sente cansado hoje?

- ☐ 1. Sim ☐ 2. Não

Com qual frequência você dirige em...

	Nunca	Quase nunca	Às vezes	Quase sempre	Sempre
14. Trecho urbano:	☐	☐	☐	☐	☐
15. Estrada:	☐	☐	☐	☐	☐
16. Calçamento:	☐	☐	☐	☐	☐
17. Estrada de terra:	☐	☐	☐	☐	☐

18. Quanto tempo, em média, dirige por dia, aproximadamente?

- ☐ 1. Até 15 min ☐ 3. De 31 a 59 min ☐ 5. De 3 a 4 horas.
☐ 2. De 16 a 30 min ☐ 4. De 1 a 2 horas ☐ 6. Mais de 4 horas.

19. Normalmente você dirige sozinho ou acompanhado?

- ☐ 1. Sozinho ☐ 2. Acompanhado

20. Você faz uso do sistema de ar condicionado, frequentemente?

- ☐ 1. Sim ☐ 2. Não

21. Normalmente, você dirige com rádio/CD ligado?

- ☐ 1. Sim ☐ 2. Não

22. Normalmente, você dirige com a janela aberta?

- ☐ 1. Sim ☐ 2. Não

23. Quais os fatores ou características mais importantes para escolha de um automóvel? (Cite até 3 atributos)

24. Qual o grau de importância do “Conforto Acústico” e “Conforto Vibracional” para você na aquisição ou permanência com um veículo?

	Pouco Importante				Muito Importante		
Conforto Acústico:	1. ☐	2. ☐	3. ☐	4. ☐	5. ☐	6. ☐	7. ☐
Conforto Vibracional:	1. ☐	2. ☐	3. ☐	4. ☐	5. ☐	6. ☐	7. ☐

AVALIAÇÃO DO VEÍCULO POR PERCURSO:

VEÍCULO: _____

CALÇAMENTO (logo após o término do trecho ainda na via marginal da BR040)

25. No geral, que nota você daria para esse veículo no percurso de calçamento?

	Excelente	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	Péssimo
Conforto Acústico:		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Conforto Vibracional:		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

26. Algum tipo de ruído ou vibração lhe causou incômodo nesse percurso? Qual?

ESTRADA (descida e subida)

27. No geral, que nota você daria para esse veículo no percurso de estrada?

	Excelente	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	Péssimo
Conforto Acústico:		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Conforto Vibracional:		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

28. Algum tipo de ruído ou vibração lhe causou incômodo nesse percurso? Qual?

URBANO (após o trevo do BH shopping no início do trecho de volta da BR)

29. No geral, que nota você daria para esse veículo no percurso de urbano?

	Excelente	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	Péssimo
Conforto Acústico:		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Conforto Vibracional:		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

30. Algum tipo de ruído ou vibração lhe causou incômodo nesse percurso? Qual?

AVALIAÇÃO FINAL DO VEÍCULO: (com o veículo parado no ponto de apoio)

31. Avaliando o veículo em todo o circuito, que nota global você daria para o ...

	Péssimo					Excelente	
Conforto acústico:	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Conforto vibracional:	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.

AVALIAÇÃO FINAL DA PESQUISA (Após as 5 avaliações):

**32. Classifique o veículo de acordo com o Conforto Acústico:
(1 = Melhor; 5 = Pior).**

- ☐ 1. Veículo A
- ☐ 2. Veículo B
- ☐ 3. Veículo C
- ☐ 4. Veículo D
- ☐ 5. Veículo E

**33. Classifique o veículo de acordo com o Conforto Vibracional:
(1 = Melhor; 5 = Pior).**

- ☐ 1. Veículo A
- ☐ 2. Veículo B
- ☐ 3. Veículo C
- ☐ 4. Veículo D
- ☐ 5. Veículo E

34. Se os 5 veículos testados por você tivessem exatamente o mesmo preço e condições de pagamento, qual deles você COMPRARIA? (SOMENTE UMA RESPOSTA)

- ☐ 1. Veículo A
- ☐ 2. Veículo B
- ☐ 3. Veículo C
- ☐ 4. Veículo D
- ☐ 5. Veículo E

35. Se os 5 veículos testados por você tivessem exatamente o mesmo preço e condições de pagamento, qual deles você NÃO COMPRARIA? (SOMENTE UMA RESPOSTA)

- ☐ 1. Veículo A
- ☐ 2. Veículo B
- ☐ 3. Veículo C
- ☐ 4. Veículo D
- ☐ 5. Veículo E