

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

Kauê Werner

**CARACTERIZAÇÃO DE ASPECTOS DO TIMBRE DE  
PRATOS DE PERCUSSÃO ATRAVÉS DE ANÁLISES  
PSICOACÚSTICAS**

Florianópolis

2015



Kauê Werner

**CARACTERIZAÇÃO DE ASPECTOS DO TIMBRE DE  
PRATOS DE PERCUSSÃO ATRAVÉS DE ANÁLISES  
PSICOACÚSTICAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Júlio Apolinário Cordioli, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Erasmo Felipe Vergara, Dr. Eng.

Florianópolis  
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Werner, Kauê

Caracterização de aspectos do timbre de pratos de  
percussão através de análises psicoacústicas / Kauê Werner  
; orientador, Júlio Apolinário Cordioli ; coorientador,  
Erasmus Felipe Vergara. - Florianópolis, SC, 2015.  
204 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Timbre. 3. Psicoacústica. 4.  
Acústica musical. 5. Pratos de percussão. I. Cordioli,  
Júlio Apolinário. II. Vergara, Erasmus Felipe. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Kauê Werner

**CARACTERIZAÇÃO DE ASPECTOS DO TIMBRE DE  
PRATOS DE PERCUSSÃO ATRAVÉS DE ANÁLISES  
PSICOACÚSTICAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 15 de junho de 2015.

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Júlio Apolinário Cordioli, Dr.Eng. – Orientador

---

Prof. Erasmo Felipe Vergara, Dr. Eng.  
Coorientador

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Andrey Ricardo da Silva, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Roberto Jordan, Dr.Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Stephan Paul, Dr.Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Dedico este trabalho a todas as pessoas apaixonadas pela música, um estilo de linguagem e expressão que aflora as diferentes sensações humanas existentes.





## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Júlio Cordioli pela orientação do trabalho nesta área de pesquisa, como também ao professor coorientador Erasmo Felipe Vergara pelo auxílio na parte de psicoacústica.

Ao colega Marcelo Portela pelas inúmeras conversas sobre música e acústica musical que se tornaram fonte de interesse e incentivo para a realização desta pesquisa. Aos colegas de laboratório Gustavo Martins, Marcelo Bustamante e Alexandre Garrincha, que me auxiliaram em vários conceitos e técnicas necessárias para a realização deste trabalho.

À empresa brasileira *Krest Cymbals*, que me recebeu em sua fábrica e forneceu modelos de pratos para experimentação. A Victor Bub, da empresa Batuka Groove, que também forneceu modelos de pratos para utilização em experimentos da pesquisa.

Ao músico, baterista e percussionista, Marcio Bicaco, pela indispensável ajuda e participação nos experimentos realizados. Aos músicos que participaram das entrevistas ou testes subjetivos: Allan Barbosa, André Marcelino, Bruno Eggert, Caio Siqueira, Cristiano Forte, Felipe Martinez, Filipe Maliska, Gabriel Dutra, Guilherme Ledoux, JC Basañez, Kaio Barp, Mauro Borghezán, Paulo Genovez, Rubén Martínez, Samir Roseiro e Yuri Juppa.

Aos meus pais que sempre me aconselham nas importantes escolhas da vida. A Juliana Gonçalves que faz parte da minha vida desde o início deste trabalho, revisou a dissertação, e sempre me apoiou através de conselhos e, acima de tudo, amor.



*A arte da vida consiste em fazer da vida  
uma obra de arte.*

(Mahatma Gandhi)



## RESUMO

O conjunto de características perceptivas de um som gerado por instrumentos musicais, denominado timbre, sempre foi fortemente caracterizado através de meios subjetivos, geralmente com adjetivos que descrevem percepções. É um conceito a ser determinado levando em consideração, as sensações auditivas, como também a percepção do músico. Pratos de percussão são instrumentos utilizados em grande parte dos estilos musicais. Existem diferentes tipos de pratos e formas de tocar, conseqüentemente, inúmeros tipos de sons. Contudo, as características sonoras dos pratos são representadas apenas através de conceitos subjetivos. Desde o começo da produção em larga escala de pratos de percussão, sempre foram utilizados adjetivos para descrever o comportamento acústico desses instrumentos. Assim, nunca houve uma padronização das características sonoras de um prato de percussão, o que sempre gerou consideráveis dificuldades de compreensão do significado que tais adjetivos visam demonstrar. Neste trabalho, buscou-se encontrar uma forma de caracterização objetiva do som emitido por certos modelos de pratos e formas de impacto, como condução e ataque, realizando medições experimentais juntamente com avaliações subjetivas envolvendo músicos percussionistas. As respostas obtidas através da aplicação de questionários foram analisadas por meio de comparações entre escalas de respostas, a fim de determinar quais os atributos empregados pelos músicos para caracterizar a sonoridade dos diferentes pratos. Por fim, procurou-se verificar a existência de correlações estatísticas entre as respostas obtidas dos questionários e modelos psicoacústicos (*Loudness*, Tonalidade, e Agudeza ou *Sharpness*). Os resultados obtidos para amostras de condução demonstram a possibilidade da utilização de alguns modelos psicoacústicos para a representação de características que compõem o timbre, como *Brilhante*, *Dark* e *Ping*

**Palavras-chave:** timbre, psicoacústica, acústica musical, pratos de percussão



## ABSTRACT

The set of perception characteristics of sound emitted by musical instruments, generally known as timbre, has always been described through subjective dimensions, for example, adjectives regarding perceptions. It's a concept to be determined regarding the auditory sensations and perceptions of the musician. Cymbals are examples of instruments used in a lot of music genres. There are numerous types of cymbals, numerous ways of playing, consequently, a countless number of sounds can be generated. Most cymbal sound characteristics are represented in a subjective medium. Since the beginning of cymbal large-scale production, the acoustic behavior of the instrument was always established by words defining sensations. Until now, there's never been a standardization of cymbal sound characteristics, creating comprehension difficulties regarding the meaning of random adjectives. In the present work, an objective characterization of the sound emitted by cymbals is proposed, using data of experimental recordings for ride and crash impacts, followed by judgment evaluation of the audio signals by musicians (drummers). Comparisons between scaling responses were made through subjective test questionnaires, in order to evaluate some of the most common sound differences for these kind of cymbals. Statistics correlations were made for a comparison with psychoacoustic models like Loudness, Tonality, Sharpness, and the response obtained with the subjective tests. The results obtained for ride samples show a possible application of psychoacoustics models to represent sound characteristics that are related to timbre, such as *Bright*, *Dark* and *Ping*.

**Keywords:** timbre, psychoacoustics, musical acoustics, cymbals





## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Variação temporal de amplitude ( $p^2$ ) e centroide espectral relativo, de um saxofone soprano.....	39
Figura 2.2	Comparação de algumas dimensões obtidas com MDS e conceitos semânticos analisados.....	42
Figura 2.3	Deslocamento do limiar de audição devido ao efeito de mascaramento gerado por tons puros.....	44
Figura 2.4	Largura da banda crítica em relação à frequência central de acordo com o modelo de Zwicker.....	45
Figura 2.5	Curva de nível de audibilidade ( <i>Equal-Loudness</i> ), adaptado da norma ISO226.....	46
Figura 2.6	Variação da sensação de Loudness por intervalo de tons impulsivos.....	48
Figura 2.7	Exemplo do procedimento gráfico para determinação de <i>Loudness</i> específica e total para um ruído de fábrica através do modelo de Zwicker.....	49
Figura 2.8	Exemplos de escala de resposta para uma sensação de agradabilidade em relação a um som.....	52
Figura 2.9	Anatomia de um prato de percussão.....	56
Figura 2.10	Modelos de prato.....	58
Figura 2.11	Modelos tradicionais de baqueta.....	59
Figura 2.12	Outros tipos de bastão.....	60
Figura 2.13	Formas mais comuns de impacto.....	60
Figura 2.14	Análise modal através de interferometria.....	61
Figura 2.15	Parâmetros empíricos para o cálculo das frequências naturais de pratos de percussão em variados tamanhos. Fonte: [68].....	62
Figura 2.16	Superior: amplitude da força de excitação harmônica ao longo do tempo. Central: amplitude da aceleração em certo ponto da superfície ao longo do tempo. Inferior: espectrograma da aceleração no ponto de resposta.....	64
Figura 3.1	Esquema das etapas de análise deste trabalho.....	67
Figura 4.1	Esquema de medição dos sinais.....	72
Figura 4.2	Posicionamento do músico participante e do torso em relação ao pedestal utilizado para suportar os pratos de percussão.....	72

Figura 4.3	Esquema do algoritmo utilizado pelo Artemis.....	75
Figura 4.4	<i>Loudness</i> específica com a aplicação de filtros na amostra 9 de condução.....	77
Figura 4.5	<i>Loudness</i> média para os sinais filtrados das amostras sonoras de condução.....	77
Figura 4.6	<i>Loudness</i> média para os sinais filtrados das amostras sonoras de ataque.....	78
Figura 4.7	Valores de centroide espectral para amostras de condução.....	79
Figura 4.8	Valores de centroide espectral para amostras de ataque.....	80
Figura 4.9	Curva suavizada da variação do centroide espectral de <i>Loudness</i> para a amostra 6 de ataque.....	81
Figura 4.10	Variação do centroide espectral de <i>Loudness</i> ao longo do tempo para as amostras sonoras de ataque.....	81
Figura 4.11	<i>Loudness</i> temporal da amostra 3 de condução.....	83
Figura 4.12	<i>Loudness</i> temporal para amostras de condução.....	83
Figura 4.13	Intervalo de impacto de 10sones ( $\Delta t_{\Delta N=10}$ ) entre as amostras sonoras de condução.....	84
Figura 4.14	Valores de <i>Sharpness</i> no modelo de Aures para amostras de condução.....	85
Figura 4.15	Valores de <i>Sharpness</i> no modelo de Aures para amostras sonoras de ataque.....	86
Figura 4.16	<i>Sharpness</i> de Aures ao longo do tempo para o mesmo prato, com excitações diferentes.....	86
Figura 4.17	Valores de <i>Sharpness</i> média para amostras sonoras de condução através de diferentes modelos.....	87
Figura 4.18	Valores de <i>Sharpness</i> média para amostras sonoras de ataque através de diferentes modelos.....	88
Figura 4.19	Valores de Tonalidade no modelo de Aures para amostras sonoras de condução.....	90
Figura 4.20	Valores de Tonalidade no modelo de Aures para amostras sonoras de ataque.....	90
Figura 4.21	Valores de Tonalidade total no modelo de Aures para amostras de condução.....	91
Figura 4.22	Valores de Tonalidade total no modelo de Aures para amostras de ataque.....	91
Figura 5.1	Divisão das etapas e procedimento do ensaio subjetivo.....	97

Figura 5.2	Interface do programa utilizado. Etapa de avaliação da característica <i>Brilhante</i> para um dos grupos de amostra. ....	97
Figura 5.3	Equipamentos e suas respectivas conexões utilizados durante as avaliações subjetivas. ....	99
Figura 5.4	Idade e tempo de convívio com pratos de percussão dos sujeitos participantes das avaliações. ....	100
Figura 5.5	Diagramas de caixa para as avaliações de amostras sonoras de condução. ....	102
Figura 5.6	Diagramas de caixa para as avaliações de amostras sonoras de ataque. ....	103
Figura 5.7	Valores de ICC para as avaliações dos grupos de amostra de condução. ....	104
Figura 5.8	Valores de ICC para as avaliações dos grupos de amostra de ataque. ....	104
Figura 6.1	Valores de ICC para as avaliações dos grupos de amostra de ataque. ....	108
Figura 6.2	Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica <i>Brilhante</i> , em relação aos valores obtidos com o modelo de <i>Sharpness</i> de Aures. ....	109
Figura 6.3	Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica <i>Brilhante</i> , em relação aos valores obtidos com o modelo de Tonalidade de Aures. ....	110
Figura 6.4	Coefficientes de correlação de Pearson para as amostras do Grupo 2, característica <i>Dark</i> , em relação aos parâmetros objetivos. ....	111
Figura 6.5	Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica <i>Dark</i> , em relação aos valores no modelo de <i>Loudness</i> com filtro passa-baixa. ....	112
Figura 6.6	Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica <i>Dark</i> , em relação aos valores obtidos com o modelo de <i>Sharpness</i> de von Bismarck. ....	113
Figura 6.7	Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica <i>Dark</i> , em relação aos valores obtidos com o modelo de Tonalidade de Aures. ....	114
Figura 6.8	Coefficientes de correlação de Pearson para as amostras do Grupo 1, característica <i>Ping</i> , em relação aos parâmetros objetivos. ....	115
Figura 6.9	Modelo de regressão linear para o Grupo 1 da caracte-	

terística <i>Ping</i> , em relação aos valores obtidos com o modelo de Tonalidade de Aures. ....	116
Figura 6.10 Modelo de regressão linear para o Grupo 1 da característica <i>Ping</i> , em relação aos valores obtidos com o desvio padrão temporal da Tonalidade de Aures. ....	117
Figura 6.11 Modelo de regressão linear para o Grupo 1 da característica <i>Ping</i> , em relação aos valores obtidos com o intervalo temporal relacionado à <i>Loudness</i> impulsiva. ....	117
Figura 6.12 Coeficientes de correlação de Pearson para as amostras dos Grupos 1 e 2, característica <i>Qualidade</i> , em relação às análises objetivas. ....	119
Figura 6.13 Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica <i>Qualidade</i> , em relação aos valores obtidos para a Tonalidade de Aures. ....	120
Figura A.1 Somatório das funções resposta em frequência do prato <i>Krest HX Series Crash 18"</i> para o intervalo de 0 a 400Hz, obtido com a análise modal. ....	136
Figura A.2 Somatório das funções resposta em frequência do prato <i>Krest HX Series Crash 18"</i> para o intervalo de 400Hz a 800Hz, obtido com a análise modal. ....	136
Figura A.3 Forma modal obtida para a primeira frequência natural $f_1 = 32,4255Hz$ . ....	137
Figura A.4 Forma modal obtida para a segunda frequência natural $f_2 = 72,4471Hz$ . ....	137
Figura A.5 Forma modal obtida para a terceira frequência natural $f_3 = 126,6956Hz$ . ....	138
Figura A.6 Forma modal obtida para a quarta frequência natural $f_4 = 189,4744Hz$ . ....	138
Figura A.7 Forma modal obtida para a oitava frequência natural $f_8 = 402,0689Hz$ . ....	139
Figura A.8 Forma modal obtida para a décima frequência natural $f_{10} = 425,1754Hz$ . ....	139
Figura A.9 Forma modal obtida para a décima quinta frequência natural $f_{15} = 553,6133Hz$ . ....	140
Figura B.1 Esquema da estrutura do experimento para o comportamento não-linear do prato. ....	141
Figura B.2 Resposta pontual obtida no experimento do prato <i>Krest Deep Cult Crash 18"</i> . ....	142

Figura B.3	Comportamento temporal de amplitude da força e aceleração ao longo da excitação senoidal de $f_{s1} = 100\text{Hz}$ . . . . .	143
Figura B.4	Espectrograma da aceleração (normalizada em relação ao ponto máximo) para uma excitação senoidal de $f_{s1} = 100\text{Hz}$ , com amplitude variável. . . . .	144
Figura B.5	Comportamento temporal de amplitude da força e aceleração ao longo da excitação senoidal de $f_{s2} = 150\text{Hz}$ . . . . .	145
Figura B.6	Espectrograma da aceleração (normalizada em relação ao ponto máximo) para uma excitação senoidal de $f_{s2} = 150\text{Hz}$ , com amplitude variável. . . . .	146
Figura B.7	Mallet utilizado no experimento, com acelerômetro acoplado. . . . .	147
Figura B.8	Aceleração medida na ponta do mallet durante intervalo de impacto, para duas intensidades de impacto. . . . .	148
Figura B.9	Espectrograma do nível de pressão sonora relativo ( $p_{\text{ref}} = p_{\text{max}}$ ) devido à excitação do impacto de menor intensidade (Fraco). . . . .	149
Figura B.10	Espectrograma do nível de pressão sonora relativo ( $p_{\text{ref}} = p_{\text{max}}$ ) devido à excitação do impacto de maior intensidade (Forte). . . . .	149
Figura C.1	O posicionamento do acelerômetro no corpo da baqueta em relação às áreas de impacto: ponta e meio. . . . .	151
Figura C.2	Esquema do experimento para obtenção da relação entre força de impacto e aceleração no corpo da baqueta. . . . .	152
Figura C.3	Relação obtida entre amplitude máxima de aceleração (positiva) e amplitude máxima de força para a ponta da baqueta. . . . .	153
Figura C.4	Relação obtida entre amplitude máxima de aceleração (positiva) e amplitude máxima de força para o meio da baqueta. . . . .	153
Figura C.5	Cálculo da força de impacto para as amostras de condução, baseado na regressão linear obtida para a ponta da baqueta. . . . .	154
Figura C.6	Cálculo da força de impacto para as amostras de ataque, baseado na regressão linear obtida para o meio da baqueta. . . . .	154
Figura D.1	Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 1 de condução. . . . .	155
Figura D.2	Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 2 de condução. . . . .	156
Figura D.3	Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 3 de condução. . . . .	156
Figura D.4	Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para	

amostra 4 de condução.....	157
Figura D.5 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 5 de condução.....	157
Figura D.6 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 6 de condução.....	158
Figura D.7 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 7 de condução.....	158
Figura D.8 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 8 de condução.....	159
Figura D.9 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 9 de condução.....	159
Figura D.10 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 10 de condução.....	160
Figura D.11 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 1 de ataque. ....	161
Figura D.12 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 2 de ataque. ....	161
Figura D.13 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 3 de ataque. ....	162
Figura D.14 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 4 de ataque. ....	162
Figura D.15 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 5 de ataque. ....	163
Figura D.16 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 6 de ataque. ....	163
Figura D.17 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 7 de ataque. ....	164
Figura D.18 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 8 de ataque. ....	164
Figura D.19 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 9 de ataque. ....	165
Figura D.20 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 10 de ataque. ....	165
Figura D.21 Espectrograma de <i>Loudness</i> (modelo de Zwicker) para amostra 11 de ataque. ....	166
Figura E.1 Interface do programa em LabView para utilização no ensaio subjetivo.....	168
Figura E.2 Resultado MDS modelo clássico, dimensões 1 e 2, amos-	

tras de condução, para cada sujeito. ....	168
Figura E.3 Resultado MDS modelo clássico, dimensões 1 e 3, amostras de condução, para cada sujeito. ....	169
Figura E.4 Resultado MDS modelo clássico, dimensões 2 e 3, amostras de condução, para cada sujeito. ....	169
Figura E.5 Resultado MDS modelo clássico, dimensões 1 e 2, amostras de ataque, para cada sujeito. ....	170
Figura E.6 Resultado MDS modelo clássico, dimensões 1 e 3, amostras de ataque, para cada sujeito. ....	170
Figura E.7 Resultado MDS modelo clássico, dimensões 2 e 3, amostras de ataque, para cada sujeito. ....	171
Figura F.1 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 1 da característica <i>Brilhante</i> . ....	173
Figura F.2 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 2 da característica <i>Brilhante</i> . ....	174
Figura F.3 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 1 da característica <i>Dark</i> . ....	174
Figura F.4 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 2 da característica <i>Dark</i> . ....	175
Figura F.5 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 1 da característica <i>Ping</i> . ....	175
Figura F.6 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 2 da característica <i>Ping</i> . ....	176
Figura F.7 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 1 da característica <i>Qualidade</i> . ....	176
Figura F.8 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 2 da característica <i>Qualidade</i> . ....	177
Figura F.9 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 1 da característica <i>Brilhante</i> . ....	178
Figura F.10 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 2 da característica <i>Brilhante</i> . ....	179
Figura F.11 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 1 da característica <i>Dark</i> . ....	179
Figura F.12 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 2 da característica <i>Dark</i> . ....	180
Figura F.13 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 1 da característica <i>Abertura</i> . ....	180
Figura F.14 Histograma de respostas nas avaliações das amostras	

de ataque para o Grupo 2 da característica <i>Abertura</i> . . . . .	181
Figura F.15 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 1 da característica <i>Qualidade</i> . . . . .	181
Figura F.16 Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 2 da característica <i>Qualidade</i> . . . . .	182
Figura G.1 Características de um grupo de dados para o cálculo do ICC. . . . .	183
Figura A.1 Resultados do experimento para o Prato <i>Zildjian Old K</i> . . . . .	186
Figura A.2 Resultados dos picos de frequência do espectro sonoro após o impacto em dois pontos da superfície, para os diferentes modelos analisados. . . . .	187



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Pratos utilizados nas gravações de condução.....	73
Tabela 4.2	Pratos utilizados nas gravações de ataque. ....	74
Tabela 5.1	Amostras sonoras de condução utilizadas nas etapas do ensaio subjetivo.....	98
Tabela 5.2	Amostras sonoras de ataque utilizadas nas etapas do ensaio subjetivo.....	98
Tabela B.1	Glossário de termos referentes ao som de pratos de percussão, apresentado pela empresa fabricante <i>Zildjian</i> . ....	189
Tabela B.2	Glossário de termos referentes ao som de pratos de percussão, apresentado pela empresa fabricante <i>Sabian</i> . ....	190



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos romanos

$\hat{\mathbf{y}}$	Vetor das predições da variável dependente
$\mathbf{y}$	Vetor da variável dependente
$c$	Fator empírico de <i>Sharpness</i>
$c_T$	Fator de correção de calibração da Tonalidade de Aures
$d$	Distância do músico em relação ao prato
$df$	Intervalo de discretização na frequência
$dt$	Intervalo de discretização no tempo
$dz$	Discretização espectral em Bark
$e_{\text{RMS}}$	Erro quadrático médio
$f$	frequência em Hz
$f_c$	Frequência de corte
$f_{m,n}$	Frequência natural do modo (m,n)
$g(z)$	Fator de peso de <i>Sharpness</i>
$h$	Altura de suporte do prato de percussão
$n_p$	Número de pontos no espectro
$p$	Pressão
$p_m$	Fator empírico exponencial
$r_{X,Y}$	Coefficiente de correlação de Pearson
$s$	Fator empírico de bandas críticas
$t_t$	Tempo total
$w_1$	Fator 1 da Tonalidade de Aures
$w_2$	Fator 2 da Tonalidade de Aures
$w_3$	Fator 3 da Tonalidade de Aures
$w_{\text{Gr}}$	Fator peso de intensidade da Tonalidade de Aures
$w_T$	Combinação dos fatores da Tonalidade de Aures
$w'_n$	Fator de correção de Tonalidade de Aures
$z$	frequência em Bark
$\mathbf{X}$	Matriz de variáveis independentes
ICC	Coefficiente de correlação intraclasse
NPS	Nível de pressão sonora
$dt_{\log_{\text{at}}}$	Logaritmo do intervalo de ataque
$Br_2$	Característica <i>Brilhante</i> grupo 2
$C_e$	Centroide espectral

$C_m$	Fator empírico de multiplicação
$D_2$	Característica <i>Dark</i> grupo 2
$E_0$	Excitação de referência
$E_{TQ}$	Excitação tonal
$F_i$	Fluxo espectral
$N'$	Loudness específica
$N'_0$	Loudness específica de referência
$N_t$	<i>Loudness</i> total
$P_1$	Característica <i>Ping</i> grupo 1
$Q_2$	Característica <i>Qualidade</i> grupo 1
$R$	Raio do prato de percussão
$R^2$	Coefficiente de regressão
$R_{aj}^2$	Coefficiente de regressão ajustado
$S_A$	<i>Sharpness</i> de Aures
$S_B$	<i>Sharpness</i> de von Bismarck
$t_0$	Tempo inicial
$t_1$	Tempo regime permanente
$T_A$	Tonalidade de Aures
$X, Y$	Séries de dados
$X_i$	Amplitude do espectro

### Símbolos gregos

$\Delta L$	Excesso de amplitude da componente tonal em relação ao ruído
$\Delta f_G$	Largura de banda crítica
$\Delta t_{\Delta N=10}$	Intervalo de decaimento de 10 sonos
$\alpha$	Ângulo de posicionamento do prato de percussão
$\beta$	vetor de estimadores mínimos quadrados
$\tau$	Expoente de decaimento do janelamento

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADSR	Envelope temporal: Ataque/Decaimento/Sustentação/Libertação
ANOVA	Análise de variância
FFT	Transformada rápida de <i>Fourier</i>
MDS	Escalonamento multidimensional
MFFC	Coefficiente cepstral em escala Mel



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>31</b>
<b>1.1 Problemática e motivação da pesquisa</b> .....	<b>31</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>32</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	32
1.2.2 Objetivos específicos .....	33
<b>1.3 Estrutura do trabalho</b> .....	<b>33</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>35</b>
<b>2.1 Timbre</b> .....	<b>35</b>
2.1.1 Análise objetiva do timbre .....	36
2.1.1.1 Análise espectral .....	37
2.1.1.2 Análise temporal .....	38
2.1.1.3 Análise espectro-temporal.....	40
2.1.2 Análise subjetiva do timbre .....	40
<b>2.2 Psicoacústica</b> .....	<b>43</b>
2.2.0.1 Mascaramento.....	43
2.2.0.2 Bandas críticas .....	44
2.2.1 Modelos psicoacústicos .....	45
2.2.1.1 Audibilidade ( <i>Loudness</i> ) .....	46
2.2.1.2 Agudeza ( <i>Sharpness</i> ) .....	49
2.2.1.3 Tonalidade.....	50
2.2.2 Acústica subjetiva .....	51
2.2.3 Análise de dados .....	53
<b>2.3 Pratos de percussão</b> .....	<b>55</b>
2.3.1 Características gerais .....	55
2.3.1.1 Métodos de fabricação.....	56
2.3.1.2 Tipos de prato .....	57
2.3.1.3 Tipos de impacto .....	58
2.3.2 Comportamento vibratório .....	61
2.3.2.1 Análise modal .....	61
2.3.2.2 Vibrações não-lineares.....	62
2.3.3 Comportamento acústico .....	63
2.3.4 Semântica do Timbre .....	65
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>67</b>
<b>4 ANÁLISE OBJETIVA</b> .....	<b>69</b>
<b>4.1 Comportamento da fonte sonora</b> .....	<b>69</b>
<b>4.2 Gravação das amostras</b> .....	<b>70</b>
<b>4.3 Processamento de sinais e modelos psicoacústicos</b> ...	<b>74</b>

4.3.1	<i>Loudness</i> total de sinais filtrados .....	76
4.3.2	Centroide espectral de <i>Loudness</i> .....	79
4.3.3	<i>Loudness</i> impulsiva .....	82
4.3.4	Agudeza ( <i>Sharpness</i> ) .....	84
4.3.5	Tonalidade de Aures .....	89
4.4	Conclusões preliminares .....	92
5	<b>ANÁLISE SUBJETIVA</b> .....	95
5.1	Método, procedimento e interface de ensaio .....	95
5.2	Equipamentos e ambiente de teste .....	98
5.3	Características dos participantes .....	99
5.4	Análise de dados .....	100
5.5	Conclusões preliminares .....	104
6	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS E DESENVOLVIMENTO DE MODELOS</b> .....	107
6.1	Condução .....	107
6.2	Ataque .....	118
7	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	121
7.1	Conclusões .....	121
7.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	124
	Referências .....	127
	APÊNDICE A – Análise modal experimental .....	135
	APÊNDICE B – Comportamento vibratório não-linear .	141
	APÊNDICE C – Aceleração e força de impacto da baqueta	151
	APÊNDICE D – Resultados análise objetiva .....	155
D.1	Espectrogramas de <i>Loudness</i> para amostras de condução .....	155
D.2	Espectrogramas de <i>Loudness</i> para amostras de ataque	161
	APÊNDICE E – Escalonamento multidimensional (MDS)	167
	APÊNDICE F – Histogramas análise subjetiva .....	173
F.1	Amostras de condução .....	173
F.2	Amostras de ataque .....	178
	APÊNDICE G – Coeficiente de correlação intraclasses (ICC) .....	183
	ANEXO A – Resultados experimentais sobre acústica de pratos .....	185
	ANEXO B – Glossário semântico para pratos de percussão	189
	ANEXO C – Códigos em MATLAB .....	191
C.1	<i>Loudness</i> DIN45631 .....	191
C.2	Coeficiente de correlação intraclasses .....	197



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Problemática e motivação da pesquisa

O conceito de timbre possui diferentes definições e, conseqüentemente, diferentes aplicações [1]. Por exemplo, o conjunto de características do som gerado por instrumentos musicais é reconhecido como timbre e sempre foi fortemente caracterizado através de termos subjetivos que descrevem as sensações auditivas. Utilizando vocabulários específicos, instrumentos são diferenciados entre si ao emitirem a mesma nota com mesma intensidade. Quais os atributos e parâmetros necessários para compreender tais diferenças? Como transcrever o vocabulário subjetivo utilizado na caracterização de determinados instrumentos para uma linguagem objetiva?

O timbre de um instrumento é um conceito a ser determinado levando em consideração, primeiramente, a sensação auditiva do músico, a qual é dependente dos mecanismos presentes no sistema auditivo [2]. A percepção auditiva aliada aos efeitos psicológicos cria as percepções e sensações sonoras. Os movimentos vibratórios das ondas de pressão irradiadas pelo instrumento atravessam as diferentes partes do sistema auditivo sendo encaminhados até a cóclea, um órgão responsável pela codificação do sinal acústico.

A compreensão e modelagem da sensação auditiva, ou da transferência do meio subjetivo auditivo para o meio objetivo acústico, é o foco de uma subárea do conhecimento chamada Psicoacústica. Nesta área, são utilizados modelos psicoacústicos específicos para determinadas sensações, os quais são desenvolvidos através de testes subjetivos com seres humanos. Por exemplo, existem modelos de Intensidade (ou Audiabilidade), mais conhecidos como modelos de *Loudness*, que representam a sensação de volume. Como também os modelos de Agudeza (*Sharpness*), *Roughness* e Intensidade de flutuação (*Fluctuation strenght*) que representam, respectivamente, percepções de densidade espectral por frequência, de modulação rápida e modulação lenta [2].

Para um melhor entendimento objetivo das características sonoras a serem analisadas, deve-se observar os fatores responsáveis pela geração do som através das diferenças existentes na fonte sonora, neste caso, os diferentes tipos de instrumentos musicais. Assim, cordofones são instrumentos que possuem cordas acopladas à estrutura, as quais tornam-se o ponto de excitação da estrutura. Aerofones são instrumentos onde o som é gerado através da ressonância de cavidades existentes

na estrutura. Membranofones são instrumentos que possuem cavidades com membranas acopladas, as quais são excitadas e geram a vibração das mesmas juntamente com as frequências naturais da cavidade [3]. Este trabalho está relacionado com instrumentos do tipo idiofone, os quais, após excitados, geram um campo acústico devido à vibração de toda a sua estrutura.

Outro fator a ser levado em consideração é a forma como o instrumento é excitado, por exemplo: sopro (escoamento de ar), arco (atrato), percussão (impacto), entre outros. Um último atributo essencial é o conceito de harmônico. Instrumentos harmônicos envolvem escalas padronizadas compostas por frequências pré-definidas responsáveis pela construção de melodias. Instrumentos que possuem uma "inarmonia", característica relacionada às escalas padrão, geralmente instrumentos de percussão [4], no decorrer das performances e composições musicais, são responsáveis pelos sons considerados ideais para a criação de ritmos e transições.

Os pratos de percussão são exemplos de idiofones utilizados em grande parte dos estilos musicais. Existem diferentes tipos de pratos, por consequência, diferentes tipos de sons [5]. Desde o começo da produção em larga escala de pratos de percussão, sempre foram utilizados adjetivos para demonstrar o comportamento acústico destes instrumentos, os quais dependem do local de procedência do prato, língua envolvida, estilo musical, entre outros fatores. Assim, não há padronização das características sonoras de um prato de percussão, o que gera consideráveis dificuldades de compreensão do significado que tais adjetivos visam demonstrar. Outro fator importante é o controle de qualidade no sistema de produção deste instrumento, que carece de medições acústicas para a análise do timbre. Nas grandes empresas fabricantes de pratos, o controle no final da produção é realizado por um técnico com audição treinada [5], sem a utilização de aquisição e processamento de sinais.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para a caracterização objetiva do som emitido por pratos de percussão nas formas de impacto de condução e ataque, utilizando modelos psicoacústicos utilizados para representar sensações auditivas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- realizar gravações sonoras de pratos de percussão utilizando um dispositivo na forma de uma cabeça artificial, a fim de se obter amostras padronizadas para ser utilizadas em testes subjetivos;
- utilizar modelos psicoacústicos para a modelagem de sensações auditivas geradas através do som dos pratos;
- realizar testes subjetivos com as amostras sonoras adquiridas, com o intuito de avaliar possíveis magnitudes das características que compõem o conceito de timbre de pratos de percussão;
- analisar os dados obtidos através das avaliações das amostras e selecionar possíveis grupos que possam uma boa confiabilidade para correlacionar com modelos psicoacústicos;
- através da correlação dos resultados, selecionar modelos psicoacústicos existentes que apresentem boas correlações estatísticas e através do método de regressão linear, propor modelos para relacionar as características analisadas que demonstram diferenças entre o timbre.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho se inicia com uma revisão bibliográfica, que aborda três conceitos indispensáveis para o entendimento do conteúdo: timbre, psicoacústica e pratos de percussão. Após a revisão, um breve capítulo apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. A etapa de desenvolvimento divide-se em três partes: análise objetiva, análise subjetiva e comparação dos resultados juntamente com desenvolvimento de modelos. Por último, tem-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. O detalhamento de etapas realizadas no decorrer do trabalho pode ser encontrado nos apêndices e anexos que procedem as referências bibliográficas.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Timbre

O timbre é um dos conceitos mais complexos relacionados à percepção sonora de instrumentos musicais. Um conjunto de definições proposto por Smalley [6], apresentado e analisado por Hirst et al. [7], mostra diferentes pontos de vista para o conceito de timbre:

- **American National Standards Institute [8]:** É um atributo proveniente de uma sensação auditiva, na qual um ouvinte pode julgar uma dissimilaridade entre dois sons apresentados de uma forma similar, mesmos tom (*pitch*) e intensidade.
- **Músico compositor:** O timbre é uma extensão da harmonia, ou vice-versa. O compositor usa uma visão espectral como base para conceitualizar a relação entre tom e qualidades sonoras, tentando negociar uma fronteira entre os dois.
- **Pesquisador:** Através de pesquisa e experiência em eletroacústica, pesquisadores estão cientes das múltiplas variáveis que determinam a identidade de um timbre, diferenciando o que é acusticamente presente do que é psicoacusticamente pertinente.
- **Pessoas em geral:** Uma linguagem atual de descrição qualitativa acessível para todos. Está relacionado com a "matéria" sonora. Termos como Brillhante/Opaco, Compacto/Amplio, Seco, Denso, etc.

O próprio autor [6] cria um termo chamado *Espectromorfologia*, definindo-o como o desdobramento e modelagem temporal de um espectro sonoro. Com esse termo, criou-se uma definição mais generalizada para timbre, qual seja: uma fisionomia sonora, na qual um conjunto *espectromórfico* específico permite uma atribuição de identidade.

Levando em conta a visão do pesquisador, a maior dificuldade é encontrar os parâmetros necessários para representar o timbre, dada a sua complexidade. Não só as características estruturais dos instrumentos influenciam no som emitido, mas também a forma como ele é tocado ou excitado mecanicamente. Uma classificação generalizada dos tipos de instrumentos musicais foi sugerida por Hornbostel e Sachs [9], dividindo-os em:

- **Idiofones:** A estrutura do instrumento gera a onda sonora sem a necessidade de cordas ou membranas, ou seja, com sua própria vibração mecânica;
- **Membranofones:** O som é gerado através das vibrações de membranas tensionadas;
- **Cordofones:** O som é gerado através das vibrações de uma ou conjunto de cordas;
- **Aerofones:** A vibração do ar em cavidades é a fonte principal de geração sonora.

A partir da divisão apresentada acima, são montados subgrupos, conforme as diferentes formas como os instrumentos são excitados mecanicamente. Em [10], o autor mostra alguns tipos de instrumentos, relacionando a parte estrutural/vibratória com o tipo de excitação. Instrumentos excitado por meio de impacto, seja ele manual ou por um objeto qualquer, são considerados instrumentos de percussão.

Um outro tipo de classificação de instrumentos é segundo a sua característica espectral, que os divide em harmônicos e inarmônicos. Geralmente instrumentos inarmônicos possuem um espectro mais denso e complexo, não servindo para aplicações melódicas compostas por frequências que se relacionam entre si de uma forma linearmente harmônica. Grande parte dos instrumentos inarmônicos é utilizada para a condução de ritmos musicais. Parâmetros como o tom (*pitch*), volume e duração do som podem ser representados através de variáveis únicas; já o timbre depende da interação entre vários aspectos físicos do som. Tais aspectos incluem *overtones* (harmônicos além da fundamental), formas de onda, pressão sonora, transientes [11].

A complexidade torna-se mais evidente quando se busca descrevê-lo dentro de um espaço: o timbre não pode ser modelado em um espaço unidimensional, mas sim apenas através de técnicas de escalonamento multidimensional (MDS - *Multidimensional Scaling*) [12]. Portanto, o timbre não é um fator facilmente identificável, mas o resultado de uma mistura de diferentes fatores que combinados causam uma impressão subjetiva [10].

### 2.1.1 Análise objetiva do timbre

Da pesquisa bibliográfica realizada, pode-se constatar que ainda não foi desenvolvida uma forma técnica e padronizada para analisar

o timbre de maneira objetiva. Por outro lado, verificou-se que alguns métodos envolvendo análise de sinais podem ser utilizados para a visualização do comportamento sonoro, dependendo do tipo de instrumento. Neste contexto, uma lista de dimensões para definir o timbre foi sugerida por Schouten [13], onde se dividiu o conceito em cinco características principais, sendo elas:

- A diferença entre caráter tonal e ruidoso;
- A envoltória espectral;
- A envoltória temporal, em termos de crescimento, duração e decaimento;
- Variações na envoltória espectral ao longo do tempo, conhecido como *formant-glide*;
- O prefixo, ou início do som, que está relacionado com a forma como o instrumento é tocado.

Diferentes estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de explorar novos aspectos sonoros e descrever características de sons musicais, sejam eles instrumentos ou trechos de composições [14]. A proposta é investigar diferentes formas de análise acústica envolvendo processamento de sinais, para construir modelos computacionais que reconheçam automaticamente dissimilaridades entre timbres. Essas formas de análise podem ser divididas em três grupos principais: espectral, temporal e espectro-temporal.

#### 2.1.1.1 Análise espectral

Um método citado por Zhang et al. [14] e utilizado por muitos outros autores, é o cálculo de um centroide espectral (ou centroide do espectro). Trata-se de um centro de inércia relativo para a distribuição da energia no espectro. O cálculo pode ser feito através da seguinte equação:

$$C_e = \frac{\sum_{k=1}^{n_p/2} f(k)|X(k)|}{\sum_{k=1}^{n_p/2} |X(k)|}, \quad (2.1)$$

onde  $C_e$  é o centroide espectral,  $f$  é a frequência,  $X_i$  é a amplitude do espectro em  $i$ ,  $k$  é o ponto no eixo de frequência e  $n_p$  é o número total de pontos no espectro.

Um outro método apresentado é o Achatamento do espectro (*Spectrum flatness*), que relaciona a densidade de picos contidos entre cada banda de frequência pré-determinada.

Em relação à maioria dos estudos de timbre realizados até hoje, o foco principal foi em instrumentos harmônicos (ou melódicos). Para este tipo de instrumento são utilizados métodos que analisam as componentes de frequência, considerando amplitude e multiplicidade em relação à fundamental (conhecida como tom). Alguns desses métodos são: Parâmetros *Tristimulus*, *Pollard1982*, variação harmônica, índice de harmonicidade, coeficiente cepstral em escala Mel (MFFC) [15] (Mel é uma escala subjetiva para a medição de frequência entre tons, definida por Stevens [16]).

### 2.1.1.2 Análise temporal

Grande parte dos instrumentos musicais possui um intervalo estacionário, porém a análise transiente das variações dinâmicas é essencial para o estudo de timbres. A envoltória temporal pode ser dividida em quatro diferentes etapas, que foram padronizadas para a síntese computacional de timbres: *A-attack* (ataque), *D-decay* (decaimento), *S-sustain* (sustentação), *R-release* (libertação); abreviadas como ADSR [17]. Para uma análise voltada ao timbre de instrumentos reais, Hajda [18] utiliza igualmente uma divisão em quatro etapas para descrever a variação dos seguintes parâmetros ao longo do tempo: amplitude e centroide espectral. Um exemplo pode ser visto na Figura 2.1, que mostra o resultado de uma gravação da nota Lá ( $A_4$ ,  $f = 440Hz$ ) tocada através de um saxofone soprano. Os intervalos temporais para instrumentos de orquestra não-percussivos são divididos por Hajda [18] em:

- Ataque: parte do sinal, a partir do início, em que a amplitude cresce e o centroide espectral decresce, até o último atingir seu mínimo local;
- Transição Ataque/Regime Permanente: a partir do mínimo local do centroide, até atingir o máximo de amplitude;
- Regime Permanente: intervalo que inicia-se com a amplitude máxima e mantém-se relativamente constante em relação à amplitude e ao centroide espectral
- Decaimento: intervalo a partir do início do decaimento da ampli-



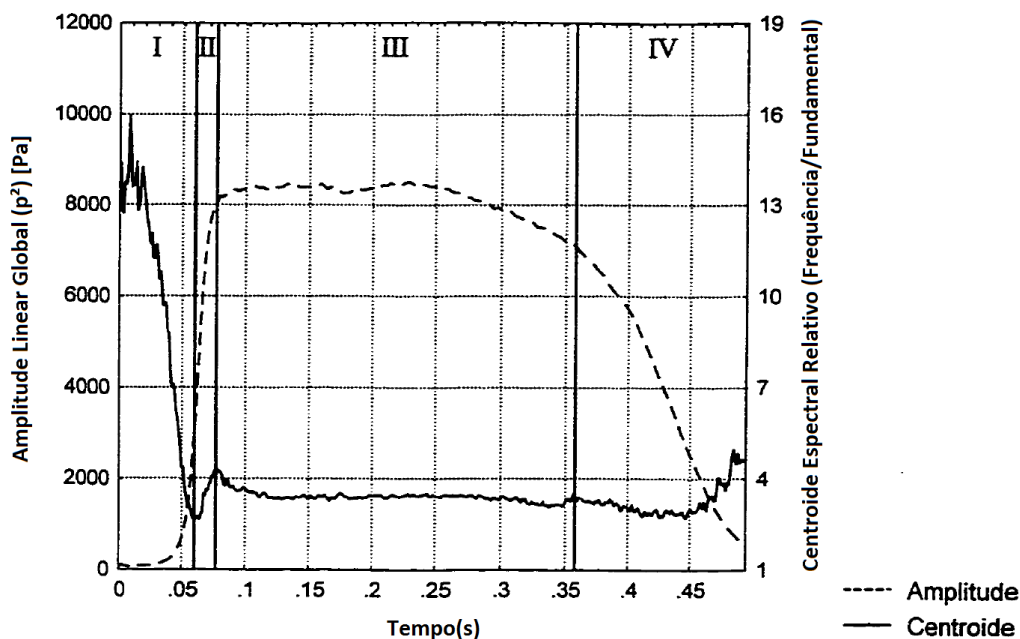


Figura 2.1 – Variação temporal de amplitude ( $p^2$ ) e centroide espectral relativo, de um saxofone soprano. Intervalos temporais: I-Ataque; II-Transição Ataque/Regime Permanente; III-Regime Permanente; IV-Decaimento. Fonte:[18].

tude em relação à média relativa do regime permanente.

A presença e o comportamento destas etapas podem variar dependendo do tipo de instrumento, bem como do tipo de excitação. Um método utilizado para o cálculo de derivação do intervalo inicial de amplitude, é o logaritmo do intervalo de ataque (*log attack time*), citado por Zhang [14], e representado através de:

$$dt_{log_{at}} = \log(t_1 - t_0) \quad (2.2)$$

onde  $T_0$  é o tempo inicial e  $T_1$  o tempo em que o sinal atinge um regime permanente ou de sustentação.

Em [19], o autor compara análises temporais obtidas para instrumentos de percussão e outros instrumentos. Verificou-se, neste estudo, que instrumentos de percussão não possuem intervalos de regime permanente, mas sim uma relação monotônica entre a amplitude e o centroide espectral, que ocorre devido ao impacto durante o ataque seguido por um longo decaimento.

### 2.1.1.3 Análise espectro-temporal

Juntando os dois tipos de análise citados acima, pode-se obter uma análise espectro-temporal. A variação do centroide espectral ao longo do tempo é um tipo de análise espectro-temporal. Outro método citado por Zhang [14] é o fluxo espectral (*spectral flux*), que calcula uma taxa de variação dos espectros ao longo do tempo, de acordo com:

$$F_i = \sum_{k=1}^{n_p/2} (|X_i(k)| - |X_{i-1}(k)|)^2, \quad (2.3)$$

onde  $F_i$  é o fluxo espectral por intervalo de tempo  $i$ ,  $X_i$  a amplitude do espectro e  $X_{i-1}$  a amplitude do espectro anterior para o ponto  $k$ .

Um trabalho envolvendo o reconhecimento das diferenças de timbre entre instrumentos musicais, para análise em sinais digitais, foi proposto por Guven [20], onde desenvolveu-se um modelo para extrair algumas características do espectrograma e, a partir delas, encontrar dissimilaridades entre instrumentos harmônicos. Outra análise de diferenciação de timbre envolvendo instrumentos de percussão com tons evidentes foi conduzida por Brent [21, 22] e baseou-se em um modelo de análise cepstral.

### 2.1.2 Análise subjetiva do timbre

Para caracterizar o timbre, há uma linguagem específica no meio musical, onde atributos verbais são utilizados para uma avaliação subjetiva das características do instrumento. O método mais utilizado para diferenciação de timbre é o escalonamento multidimensional (MDS), uma técnica frequentemente aplicada na exploração multivariável através da análise de dados [23]. Em relação ao timbre, com este método, procura-se obter uma medida de dissimilaridade entre dois sons, sendo ela quantificada através de distâncias relativas. Separa-se um grupo de sons envolvendo diferentes tipos de instrumentos para ser utilizado em testes de avaliação com ouvintes, a fim de se obter uma medida de similaridade entre cada par de sinais. A partir das respostas, uma matriz de dissimilaridades é criada, contendo um valor referente à comparação feita entre cada par. No questionário deste tipo de método existe apenas uma pergunta principal a ser respondida: O quão diferente/semelhante são esses sons? A resposta pode ser obtida por meio de escala, onde existem dois extremos: Muito diferentes/Pouco semelhantes; e Pouco

diferentes/Muito semelhantes. O objetivo é determinar o número de dimensões suficiente para uma possível representação do conceito de timbre. Tais dimensões são determinadas através da relação entre as dissimilaridades.

Existem diferentes formas de cálculo neste método, como MDS Clássica e MDS Não-clássica. As equações para o cálculo não serão apresentadas neste trabalho, mas são mostradas em [23–25]. O *software MATLAB* possui uma plataforma para a aplicação deste método [26]. Uma análise utilizando o método de MDS foi realizada por Grey [27], onde foram obtidas medições subjetivas envolvendo timbre de instrumentos presentes em orquestras sinfônicas. Com relação à análise temporal, em [28], o autor conduziu testes de dissimilaridade com MDS também com instrumentos de orquestras. O sinal foi analisado de três formas diferentes, primeiro com o sinal completo, em seguida apenas com o intervalo de ataque e, por fim, sem o intervalo de ataque. Comparando as dimensões obtidas nas três etapas, concluiu-se que a retirada do intervalo de ataque, ou apenas a utilização do mesmo, torna as dimensões de percepção muito diferentes das obtidas com o sinal normal. Assim, para instrumentos harmônicos de orquestra, a conexão entre os dois intervalos é essencial para a diferenciação entre timbres.

Outra forma de análise subjetiva voltada ao timbre, é a relação direta entre atributos verbais (ou semânticos) existentes. Em [29], uma análise foi realizada envolvendo uma lista de atributos utilizados na língua inglesa referentes ao timbre de instrumentos de orquestra. Foram realizados testes subjetivos, nos quais os ouvintes deveriam ordenar diferentes tipos de instrumento em relação a cada atributo. O autor observa que alguns atributos apresentaram uma maior variância nas respostas obtidas, para os quais, conclui, existe uma dificuldade maior de percepção ou, então, não são adequados para fins de diferenciação de timbre.

Outro trabalho envolvendo semântica apresentado por Shubert [30], focou em um atributo muito utilizado em diferentes instrumentos, o brilho (*Brightness*). Foram realizados ensaios, onde os sujeitos participantes classificaram o nível de brilho através de comparações entre instrumentos harmônicos, como também entre tons e combinações dos mesmos. Com os resultados dos ensaios, os níveis julgados foram comparados com o centroide espectral de cada instrumento durante o regime permanente da envoltória temporal. O autor conclui que, para os instrumentos estudados, o centroide espectral possui uma boa correlação com o atributo de brilho. Em [31], o autor criou uma escala multidimensional de quatro dimensões, relacionando alguns atributos

verbais como *dull-sharp* (amorfo-afiado) com o ponto de concentração de energia no espectro; e *compact-scattered* (compacto-espalhado) com a relação tonal/ruído de acordo com a densidade do espectro.

Um dos trabalhos mais consistentes neste assunto foi apresentado por Elliot et al. [32], onde foram analisados instrumentos harmônicos de orquestra. Primeiramente, uma análise MDS foi realizada, da qual foram obtidas cinco dimensões consideráveis para o timbre. Foi feito o cálculo de bi-variância das dimensões obtidas em relação aos conceitos semânticos utilizados na língua inglesa, todos em pares, indicando extremos em uma determinada escala conceitual. Um exemplo do resultado pode ser visto na Figura 2.2. Assim, a cada dimensão, foram atribuídos alguns conjuntos de escalas bipolares conhecidos como diferenciais semânticos. Por último, as dimensões foram correlacionadas a métricas acústicas e conceitos de processamento de sinais. Os autores encontraram ótimas correlações de algumas dimensões com modulações do espectro, ou seja, análises espectro-temporais.

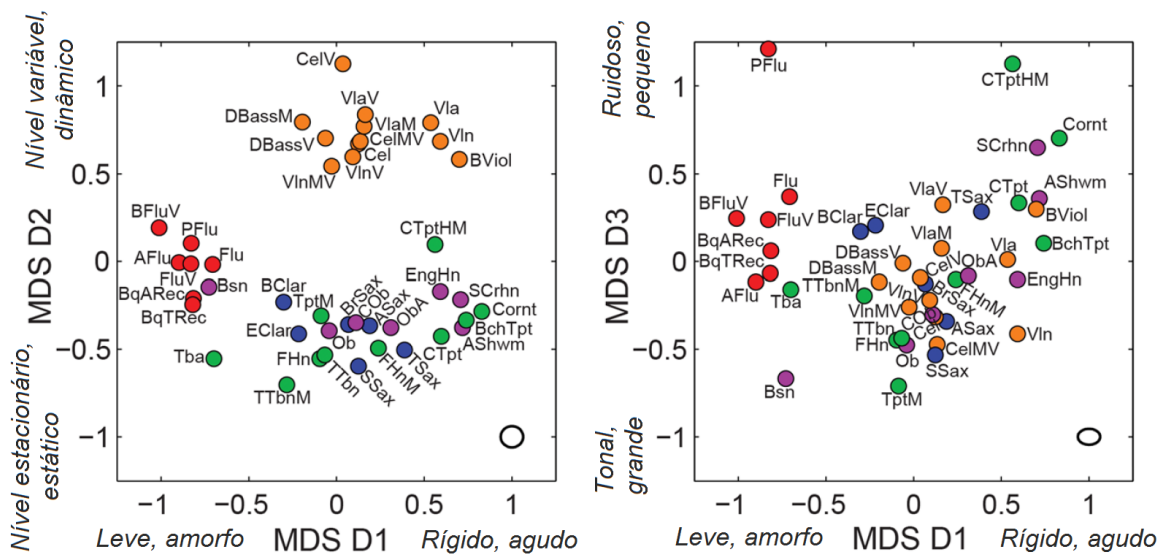


Figura 2.2 – Comparação de algumas dimensões obtidas com MDS e conceitos semânticos analisados. Gráfico da esquerda: comparação das dimensões 1 e 2. Gráfico da direita: comparação das dimensões 1 e 3. Cada cor está relacionada a um tipo de instrumento. Laranja: cordas (violino, cello, etc); Vermelho: flautas; Verde: metais (trompete, trombone, etc); Azul: palheta simples (saxofone, clarinete, etc); Roxo: palheta dupla (oboé, fagote, etc). Fonte:[32].

## 2.2 Psicoacústica

A psicoacústica é uma área de estudo que relaciona física, psicologia e fisiologia, e tem por objetivo interpretar as sensações auditivas relacionadas à percepção humana. A habilidade do sistema auditivo em receber informações é determinada não somente pela relação qualitativa entre som e impressão, mas também pela relação quantitativa entre estímulos acústicos e sensações auditivas [2]. Este tipo de relação é investigada tanto através da aquisição de dados experimentais, quanto por meio de modelos que simulam os aspectos medidos de uma forma compreensível.

Conhecimentos sobre o processamento de sinais no sistema auditivo e a evocação de sensações auditivas, como a sensação de volume, são os resultados dos estudos em psicoacústica. Estes conhecimentos podem ser utilizados para quantificar as dimensões elementares do evento auditivo e para gerar modelos psicoacústicos [33]. A caracterização de um evento sonoro é pré-requisito para qualquer tipo de intervenção que tenha por finalidade melhorar ou compreender as suas características. Esta é feita através da relação entre os atributos de cunho semântico e subjetivo com técnicas de análise de sinais e, subsequentemente, entre parâmetros físicos e modelos psicoacústicos [33].

A compreensão do sistema auditivo humano é essencial para o desenvolvimento de modelos psicoacústicos. Tais modelos buscam representar as sensações obtidas quando uma onda mecânica de pressão sonora entra no sistema auditivo e o estímulo provocado é transferido para o cérebro através de sinais elétricos. Em cada etapa do caminho, a onda sonora sofre efeitos provenientes da fisiologia do sistema auditivo, que interferem na resposta. Torna-se necessário o entendimento e modelagem de alguns efeitos fisiológicos responsáveis pelo desenvolvimento da percepção sonora.

### 2.2.0.1 Mascaramento

O mascaramento é um efeito que pode estar presente quando existe uma junção entre dois sinais sonoros diferentes, que podem ser a combinação de dois tons puros (ou bandas de frequência), como também um tom puro e um ruído de banda. Este efeito pode ser explicado como a anulação da percepção sonora de um determinado som, devido à aparição de outro som, ou seja, altera-se o limiar auditivo relativo. Quando um sinal sonoro afeta completamente a percepção de um ou-

tro, considera-se que o último como está dentro da faixa de mascaramento do primeiro. A fonte deste efeito é o comportamento vibratório da membrana basilar, que, durante seu movimento para determinadas faixas de frequência, tem outras partes da sua estrutura deslocadas, afetando na percepção de sinais sonoros nas faixas correspondentes.

Alguns testes envolvendo exemplos de mascaramento entre tons puros de diferentes frequências ou tons puros e ruído (com diferentes larguras de banda) são analisados em [2], nos quais foram observadas características tanto temporais como espectrais. Um exemplo da variação do mascaramento de dois tons  $f_1 = 400\text{Hz}/f_2 = 2\text{kHz}$  de acordo com a amplitude do sinal mascarante por ser visto na Figura 2.3, para diferentes níveis de pressão. As linhas mostram um valor mínimo do nível de pressão, para que qualquer outro tom puro ou banda de frequência pertencente àquela faixa, torne-se audível.

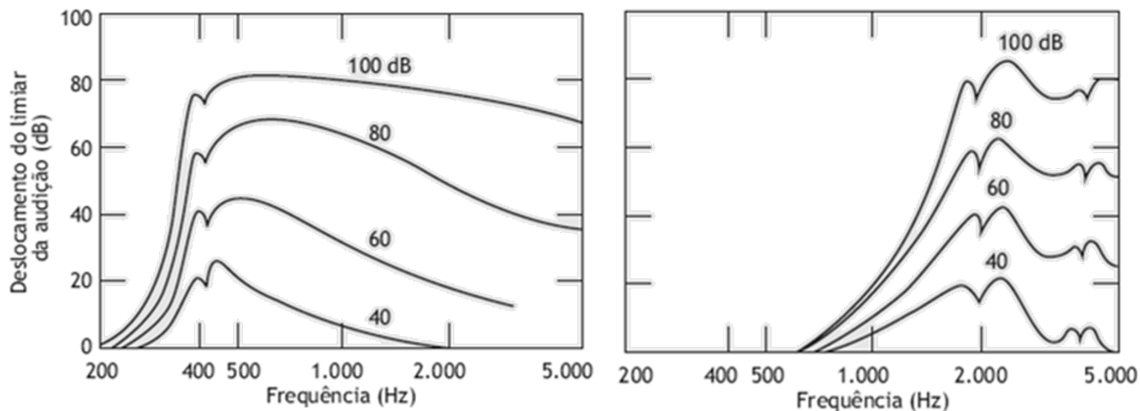


Figura 2.3 – Deslocamento do limiar de audição devido ao efeito de mascaramento gerado por tons puros: esquerda  $f_1 = 400\text{Hz}$ ; direita  $f_2 = 2\text{kHz}$ . Fonte:[34].

### 2.2.0.2 Bandas críticas

Considerando os efeitos de mascaramento entre tons puros e bandas de ruído, chegou-se à conclusão de que o sistema auditivo processa o som através de bandas de frequências, definidas como bandas críticas. A largura das bandas varia de acordo com a frequência. Após a realização de testes subjetivos, Zwicker [35] obteve um modelo para largura

da banda em função da frequência, conforme:

$$\frac{\Delta f_G}{\text{Hz}} = 25 + 75 \left[ 1 + 1,4 \left( \frac{f}{\text{kHz}} \right)^2 \right]^{0,69}, \quad (2.4)$$

sendo  $\Delta f_G$  a largura de banda crítica em função da frequência  $f$ . Os resultados obtidos são mostrados na Figura 2.4.

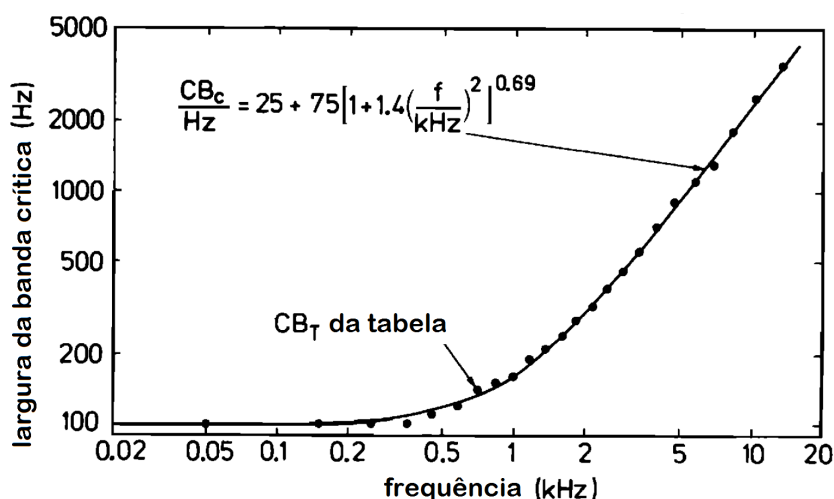


Figura 2.4 – Largura da banda crítica em relação à frequência central de acordo com o modelo de Zwicker. Fonte:[35].

Devido à importância do conceito de banda crítica na descrição de sensações auditivas, definiu-se a escala conhecida como índice de banda crítica, com uma unidade chamada Bark [35]. Esta escala considera a relação entre as diferentes bandas críticas, levando em conta os efeitos de sobreposição entre elas. O modelo que define a escala *Bark* pode ser aproximado por:

$$\frac{z}{\text{Bark}} = 13 \arctan\left(\frac{0,76f}{\text{kHz}}\right) + 3,5 \arctan\left(\frac{f}{7,5\text{kHz}}\right)^2, \quad (2.5)$$

onde  $z$  é o valor da frequência central da banda crítica, na unidade Bark.

### 2.2.1 Modelos psicoacústicos

Nas próximas seções, será apresentada uma revisão dos modelos psicoacústicos utilizados deste trabalho, sendo: *Loudness*, Agudeza (*Sharpness*) e Tonalidade. Existem outros modelos como *Roughness*

e Intensidade de flutuação (*Fluctuation strenght*) [2] porém, não serão apresentados detalhes sobre o desenvolvimento e aplicação dos mesmos.

### 2.2.1.1 Audibilidade (*Loudness*)

A Audibilidade (*Loudness*) pertence a uma categoria de sensações de intensidade sonora (ou volume). A medição do nível de *Loudness* (ou nível de Audibilidade) foi estabelecida para caracterizar a sensação de volume de qualquer tipo de som. Define-se o nível de *Loudness*, para um som qualquer, como a sensação de volume equivalente à sensação de volume sonoro gerada por uma onda plana, com um determinado Nível de Pressão Sonora (NPS), incidência frontal e tonal com frequência de 1kHz [2]. Define-se para o nível de *Loudness* uma unidade, o *phon*, onde  $40\text{phon}$  representa a sensação de volume sonoro de uma onda plana de 1kHz e NPS de 40dB. Desta definição, tem-se que todas as curvas devem ser referentes ao valor de NPS em 1kHz, que possui o mesmo valor em dB que o valor da curva em *phon*. Foram realizados testes em laboratórios com o intuito de se obter curvas de mesmo nível de *Loudness* (*Equal-Loudness*) para tons puros. A Figura 2.5 mostra as curvas da norma ISO226-2003.

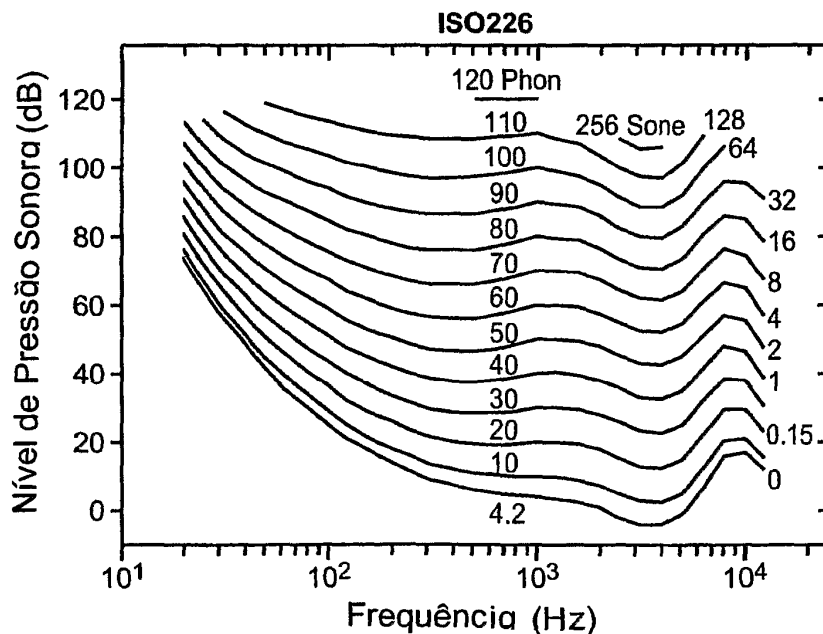


Figura 2.5 – Curva de nível de audibilidade (*Equal-Loudness*), adaptado da norma ISO226. Fonte:[36].

Levando em consideração a dependência espectral da sensação de



volume sonoro em relação às bandas críticas, ao volume de excitação e a efeitos de mascaramento, um modelo para o cálculo da *Loudness* Total ( $N$  [sone]) pode ser baseado na integral sobre as *Loudness* parciais, tal que:

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N' dz, \quad (2.6)$$

onde  $N'$  é conhecida como *Loudness* Específica (*Specific Loudness*) dada em  $[\frac{\text{sone}}{\text{Bark}}]$  [2].

Stevens [16] sugere que uma sensação pertencente à categoria de intensidade deve apresentar uma relação descrita pela Lei de Potência de acordo com variáveis físicas. Assim, a *Loudness* Específica pode ser modelada através da relação [2]:

$$N' = N'_0 \left( \frac{E_{\text{TQ}}}{sE_0} \right)^k \left[ \left( 1 + \frac{sE}{E_{\text{TQ}}} \right) - 1 \right] [\text{sone}], \quad (2.7)$$

onde  $N'$  é a *Loudness* específica por banda crítica;  $N'_0$  a *Loudness* específica de referência;  $E_{\text{TQ}}$  a excitação tonal da onda sonora;  $E_0$  a excitação de referência;  $k$  um fator empírico igual a 0,23 e  $s$  um fator empírico que varia de acordo com as bandas críticas. Foi atribuído o valor unitário de *Loudness* igual a 1sone para um tom puro em campo livre, frequência de 1kHz e NPS = 40dB. Em relação às curvas de *Equal-Loudness*, tem-se que 1sone = 40phon, onde cada aumento de 10phon equivale ao dobro do valor anterior em sone (50phon = 2sones).

Uma dependência evidente nesta sensação é a temporal. Para tons impulsivos, intervalos menores que 100ms, a relação é decrescente. Já para maiores durações, a sensação torna-se independente do tempo [2], como mostra a Figura 2.6.

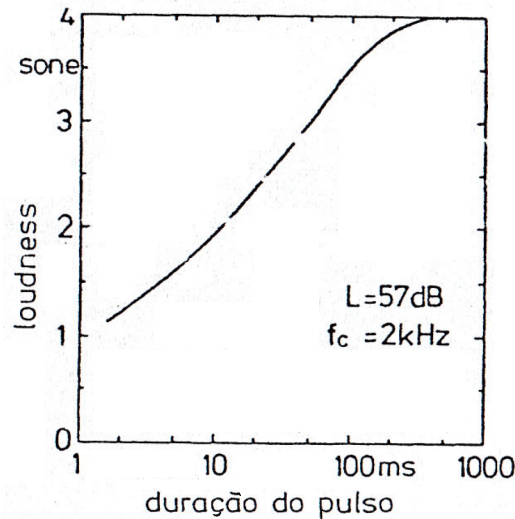


Figura 2.6 – Variação da sensação de Loudness por intervalo de tons impulsivos. Fonte:[2].

Os três principais modelos de *Loudness*, desenvolvidos e utilizados até hoje são os seguintes:

- Modelo de Stevens [37]: um dos primeiros modelos desenvolvido, trata-se da análise do volume por bandas de oitava e consta na norma ISO532-1975(método A) [38].
- Modelo de Zwicker [39, 40]: é um método que realiza o cálculo do nível de Loudness através de bandas de 1/3 de oitava e considera efeitos de mascaramento. Foi primeiramente normatizado na ISO532-1975(método B) [38] e atualizado no anexo A1 da norma DIN45631. Um exemplo de resultado utilizando este modelo pode ser visto na Figura 2.7.
- Modelo de Moore [41] e Glasberg [42]: baseia-se na Equação 2.6 acrescentando outros parâmetros temporais, como a análise a partir do formato da onda sonora ao invés do espectro. Este modelo consta na norma ANSI-S3.4-2007.

Grande parte dos modelos utilizados atualmente possuem apenas aplicações para sinais sonoros em regimes permanentes. Contudo, foram propostos alguns tipos de análise para sinais transientes, utilizando cálculos de percentil (*percentile*) e envolvendo modelos de regime permanente [43–45]. O percentil é uma métrica utilizada em análise estatística que indica um valor mínimo encontrado em uma determinada porcentagem do grupo de dados observados.

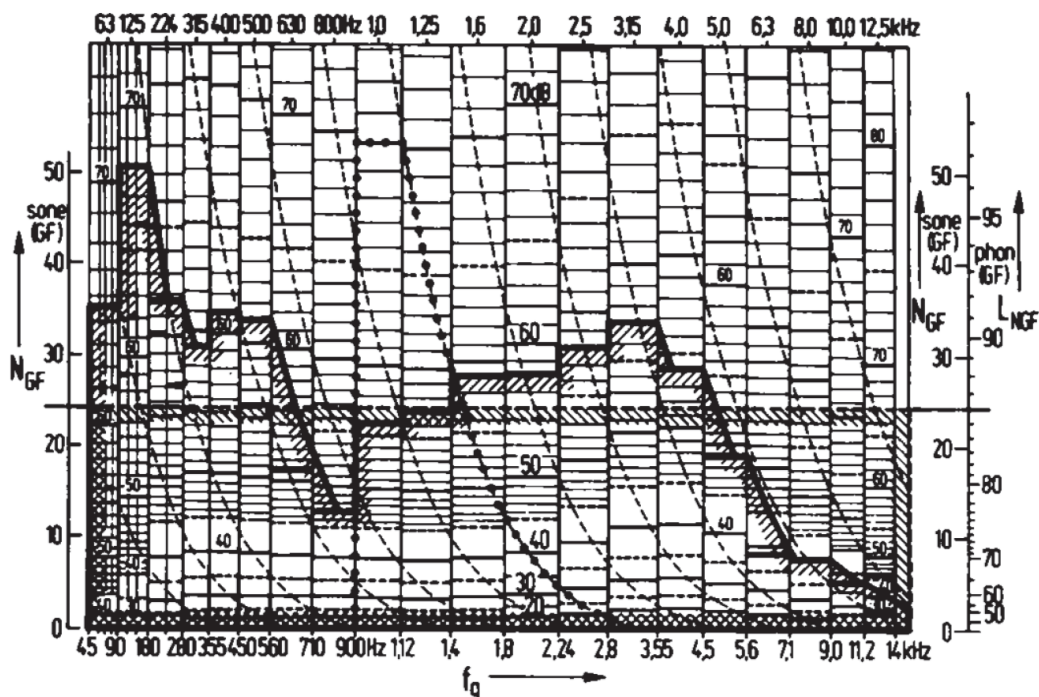


Figura 2.7 – Exemplo do procedimento gráfico para determinação de *Loudness* específica e total para um ruído de fábrica através do modelo de Zwicker. Fonte:[2].

### 2.2.1.2 Agudeza (*Sharpness*)

O modelo de agudeza *Sharpness*, descreve sensações sonoras agudas e estridentes. Ele leva em consideração a distribuição e a densidade do espectro, estando assim diretamente relacionado com a *Loudness* específica. Existem dois modelos principais para a sensação de agudeza. O primeiro foi desenvolvido por von Bismarck [46], que propôs um método para aplicação em sons de regime permanente e relaciona-os ao conceito de timbre. Nesse modelo calcula-se a agudeza conforme:

$$S_B = c \frac{\int_0^{24\text{Bark}} N' g(z) z dz}{N_t} [\text{acum}], \quad (2.8)$$

onde  $S$  é a agudeza,  $N_t$  a *Loudness* total,  $N'$  a *Loudness* específica por banda crítica  $z$ ,  $c = 0,11$  é um fator empírico e  $g(z)$  uma função de peso igual a 1, se  $z < 14$ . Para  $z > 14$  pode ser aproximado como:

$$g(z) = 0,00012z^4 - 0,0056z^3 + 0,1z^2 - 0,81z + 3,51. \quad (2.9)$$

Algumas alterações no modelo de von Bismarck foram sugeridas por Aures et al. [47], introduzindo uma variação logarítmica de acordo com a *Loudness* total:

$$S_A = c' \int_0^{24\text{Bark}} \frac{N' g'(z) dz}{\ln\left(\frac{N_t+20}{20}\right)} [\text{acum}], \quad (2.10)$$

sendo  $c' = 0,0339$  e a função  $g'(z)$  conforme a expressão a seguir:

$$g'(z) = 0,0165e^{0,171z}. \quad (2.11)$$

A unidade utilizada nestes modelos é o acum, onde 1acum refere-se à sensação de agudeza de uma banda crítica com frequência central de 1kHz e NPS de 60dB.

### 2.2.1.3 Tonalidade

Um modelo de tonalidade foi proposto por Aures et al. [47], com o intuito de medir a sensação auditiva provocada por componentes tonais existentes em um sinal de ruído qualquer. O modelo considera a frequência, a banda crítica e a amplitude de cada componente tonal existente no espectro. Em [48] os autores fazem uma análise do método e apresentam a dedução das equações envolvidas. As três variáveis consideradas são divididas em fatores, calculados através de:

$$w_1(\Delta z_i) = \frac{0,13}{\Delta z + 0,13}, \quad (2.12)$$

$$w_2(f_i) = \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 0,2\left(\frac{f}{700} + \frac{700}{f}\right)^2}} \right)^{0,29}, \quad (2.13)$$

$$w_3(\Delta L_i) = \left( 1 - e^{-\frac{\Delta L}{15}} \right)^{0,29}, \quad (2.14)$$

sendo  $\Delta z$  a banda crítica da componente em Bark,  $f$  a frequência central da componente tonal e  $\Delta L$  o excesso de amplitude da componente tonal em relação ao ruído, calculado através da equação proposta por Ternhardt [49]:

$$\Delta L_i = L_i - 10 \log \left( \sum_{k \neq 1}^n [A_{\text{Ek}}(f_i)]^2 + E_{\text{Gr}}(f_i) + E_{\text{HS}}(f_i) \right) \text{dB} \quad (2.15)$$

As funções de peso dos parâmetros  $w_1$ ,  $w_2$  e  $w_3$  são combinadas relacionando todas componentes com excesso de amplitude conforme:

$$w_T = \sqrt{\sum_{i=1}^n [w'_1(\delta z_i)w'_2(f_i)w'_3(\Delta L_i)]^2}, \quad (2.16)$$

onde  $w'_n$  é um fator de correção definido por  $w'_n = w_n^{1/0,29}$ , para  $n = 1, 2, 3$ . Um outro fator de a ser acrescentado é uma relação da intensidade das componentes tonais com a intensidade total, sendo:

$$w_{Gr} = 1 - \frac{N_{Gr}}{N}, \quad (2.17)$$

onde  $w_{Gr}$  o fator de peso de intensidade e  $N_{Gr}$  é a *Loudness* das componentes tonais. Combinando todos os fatores citados acima, tem-se que o modelo de Tonalidade de Aures é dado por:

$$T_A = c_T w_T^{0,29} w_{Gr}^{0,79}, \quad (2.18)$$

onde  $c_T$  é um fator de correção para calibração da unidade e  $T_A$  a Tonalidade de Aures. A unidade utilizada para a tonalidade é o tu, sendo que o valor unitário de 1tu refere-se à tonalidade de uma onda senoidal com frequência 1kHz e NPS de 60dB.

Existem outros modelos de tonalidade como a razão de proeminência (*proeminence ratio*) e a razão tom-ruído (*tone-to-noise ratio*), ambos apresentados na norma ECMA-74 [50]. A razão de proeminência é baseada na relação entre as amplitudes das bandas críticas. Já a razão tom-ruído está relacionada com a amplitude de um tom puro, dentro de uma das bandas críticas. Ambos os modelos não foram utilizados neste trabalho.

### 2.2.2 Acústica subjetiva

Uma parte importante no reconhecimento da percepção e sensação sonora é a análise subjetiva. A construção e a validação de qualquer modelo psicoacústico são extremamente dependentes de avaliações subjetivas dos conceitos a ser observados, envolvendo o julgamento de pessoas ao ouvirem amostras de sinais acústicos pré-selecionados. A utilização de modelos já existentes para a caracterização de sons mais complexos só pode ser realizada com os resultados de testes subjetivos.

O uso de técnicas de medição psicológica permite o acesso a informações condizentes com os estímulos sonoros a ser avaliados. A determinação dos atributos é de grande importância, já que o instrumento de medida a ser utilizado precisa ser adequado tanto ao fenômeno sob investigação, quanto à população usuária. Isto envolve aspectos linguísticos, semânticos, culturais e da experiência prévia dos indivíduos com o fenômeno [33]. Dentre os métodos de medição psicológica comumente utilizados para caracterização e avaliação subjetiva, destacam-se a comparação pareada e o ordenamento como métodos que fornecem dados ordinais; e, a escala de resposta, estimativa de magnitude e diferencial semântico como métodos que fornecem dados intervalares ou do tipo razão [51]. Neste trabalho, foi utilizada uma combinação entre métodos ordinais.

As escalas de resposta são utilizadas em diferentes métodos, tendo como objetivo principal a obtenção de valores relativos a atributos. Os atributos são julgados através de uma escala, sendo ela numérica ou semântica; como também contínua ou discretizada. Um método é definido como diferencial semântico quando uma escala de resposta é geralmente discretizada e contém um par semântico de antônimos nas extremidades. Um exemplo de quatro possíveis combinações para a utilização de escalas de resposta em métodos de avaliação psicológica pode ser visto na Figura 2.8.

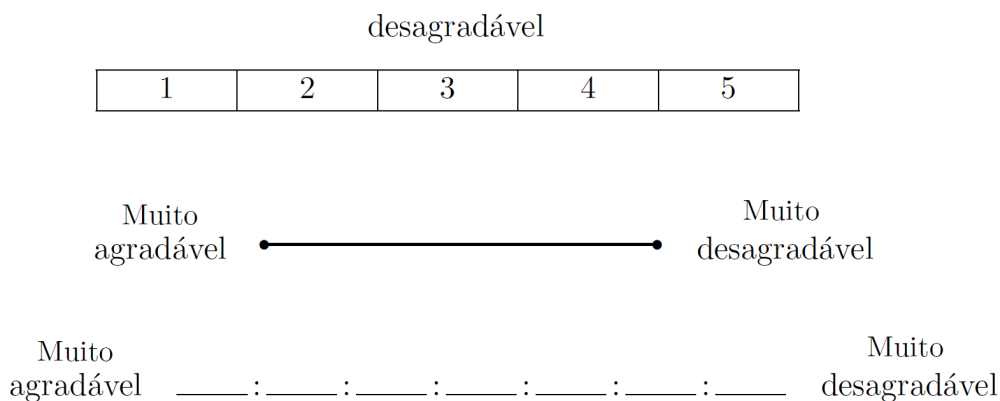


Figura 2.8 – Exemplos de escala de resposta para uma sensação de agradabilidade em relação a um som. Escalas discreta (superior), contínua (inferior). Fonte: Autor.

Na comparação pareada realiza-se o julgamento relativo entre estímulos, em pares ou mais. Determina-se um atributo a ser julgado e o

sujeito participante do teste deve julgar conforme o critério envolvido. Existem algumas variações deste método como: tarefas de detecção (*detection tasks*), tarefas de avaliação (*evaluation tasks*) e tarefas de similaridade (*similarity tasks*) [33]. A utilização de tarefas envolvendo similaridade é uma das mais utilizadas no estudo do timbre de instrumentos [27, 28, 52–54]. O objetivo é obter a diferença em relação ao atributo entre dois ou mais sons. Esta diferença é julgada através de uma escala de resposta (contínua ou discretizada), com os extremos definidos como: "muito semelhantes" e "muito diferentes", por exemplo. A partir das respostas da escala, pode-se obter uma matriz de dissimilaridades, que é o conjunto de dados necessários para uma análise de MDS.

### 2.2.3 Análise de dados

A última etapa de um estudo na área de psicoacústica é a análise dos dados. Trata-se da comparação entre os modelos psicoacústicos utilizados com os resultados obtidos através da análise envolvendo acústica subjetiva. A forma de análise de dados depende do tipo de teste subjetivo realizado. Primeiramente, observa-se a concordância e variância das respostas obtidas nos testes subjetivos, analisando a existência de consideráveis diferenças entre os participantes.

Um método estatístico para observar as respostas obtidas nos testes é o diagrama de caixas (*box plot*). Neste tipo de gráfico, são mostradas as medianas dos julgamentos feitos pelos sujeitos para cada amostra utilizada, juntamente com intervalos de quartis. Para quantificar a correlação entre os julgamentos de todos os participantes para um grupo de sinais avaliados, usa-se o coeficiente de correlação intraclass ICC (*intraclass correlation coefficient*) [55, 56], um método estatístico baseado na variância e no coeficiente de correlação de Pearson [57, 58], sendo utilizado para se obter uma visão objetiva da confiabilidade entre avaliadores. O coeficiente de correlação de Pearson  $r$ , entre duas séries de dados  $X$  e  $Y$ , pode ser calculado como:

$$r_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.19)$$

Os diferentes tipos de ICC são utilizados dependendo das características e objetivos das séries de dados a ser analisadas [59]. Alguns atributos de entrada são provenientes de um conjunto de análise es-

tatística chamado ANOVA (Analysys of Variance). O primeiro modelo para o coeficiente ICC foi apresentado por Fischer [60], em seguida outras variações foram desenvolvidas, conforme a análise requerida [59]. O cálculo do coeficiente juntamente com seus respectivos parâmetros são apresentados e explicados de forma mais detalhada no Apêndice G.

Com a obtenção de uma concordância considerável do julgamento entre os sujeitos, na próxima etapa procura-se a correlação das respostas subjetivas com valores calculados através de modelos psicoacústicos conhecidos. Um método muito utilizado neste caso é o cálculo do coeficiente de correlação de *Pearson* entre a série de dados obtida pela análise subjetiva do atributo e a série de dados obtidos com modelos psicoacústicos. Ou seja, é o coeficiente de correlação entre o vetor com valores da escala de resposta dos estímulos avaliados e o vetor de valores obtidos através de um modelo psicoacústico.

A partir de uma boa correlação entre os dados subjetivos e objetivos, em relação a uma determinada característica sonora avaliada, pode-se criar modelos aproximados para o cálculo da percepção ou sensação esperada. Técnicas de regressão linear, que correlacionam as variáveis dependentes a uma ou mais regressoras, também conhecidas como variáveis independentes, são as mais utilizadas para o desenvolvimento desses modelos. As variáveis devem ter um caráter intervalar, sendo representadas de forma escalar. Quando se objetiva incorporar diferentes modelos psicoacústicos (variáveis) para o desenvolvimento, utiliza-se uma regressão linear múltipla dada por [61]:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,n} \\ 1 & x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{m,1} & x_{m,1} & \cdots & x_{m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

onde  $y_i$  é a variável dependente (nível do atributo ou característica proveniente nos testes subjetivos) para o estímulo  $i$ ;  $x_{ij}$  é o valor da variável independente (modelo psicoacústico)  $j$  para o estímulo  $i$ ;  $\beta_j$  é o coeficiente de regressão para a variável independente  $j$  e  $e_j$  o erro considerado.

Para o cálculo dos coeficientes de regressão utiliza-se o método dos mínimos quadrados através de estimadores [61]:

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y}, \quad (2.21)$$



onde  $\hat{\beta}$  é o vetor com os estimadores mínimos quadrados,  $\mathbf{X}$  a matriz com as variáveis independentes e  $\mathbf{y}$  o vetor com as variáveis observadas (variáveis dependentes).

Assim pode-se obter predições  $\hat{\mathbf{y}}$ , de  $\mathbf{y}$  através de:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\beta}, \quad (2.22)$$

onde  $\hat{\mathbf{y}}$  são as predições de  $\mathbf{y}$ .

Para quantificar a adequação do modelo obtido, utiliza-se o coeficiente de regressão  $R^2$  ( $0 \leq R^2 \leq 1$ ) e o coeficiente de regressão ajustado  $R_{aj}^2$  ( $0 \leq R_{aj}^2 \leq 1$ ). A adição de uma variável ao modelo sempre aumentará  $R^2$ , independente da variável adicional ser estatisticamente significativa ou não. Como alternativa, recomenda-se utilizar o coeficiente de regressão ajustado  $R_{aj}^2$ , que só tem seu valor aumentado se a variável adicionada reduzir o erro médio quadrático do modelo [33].

## 2.3 Pratos de percussão

Os pratos de percussão são instrumentos que fazem parte da maioria dos estilos musicais. Os modelos mais utilizados atualmente por bateristas começaram a aparecer durante a primeira metade do século XX, em paralelo ao surgimento da própria bateria. Após a evolução e aparição de diferentes estilos como o Rock e Jazz, as exigências e interesses dos músicos nas características dos pratos foram aumentando, o que incentivou e continua impulsionando a produção industrial do instrumento até hoje.

A aparência geométrica deste instrumento não evidencia a complexidade da gama de diferentes tipos de sons que podem ser gerados, que dependem da forma e local onde foi tocado, onde foi ouvido e, obviamente, do próprio modelo de prato. Todos estes fatores tornam o timbre do prato uma variável multidimensional e deve ser analisado levando-se tal complexidade em consideração. Com base na experiência, acredita-se que o timbre de um prato de percussão considerado "bom" deve conter uma alta densidade de frequências desde graves até agudas, que se realçam e misturam-se harmonicamente entre si [5].

### 2.3.1 Características gerais

De forma geral, o prato de percussão é um disco metálico fino (espessura consideravelmente menor que o raio), apoiado através de um

furo no centro. A maioria dos pratos possui uma deformação vertical que aumenta na direção positiva do raio formando um ângulo na seção transversal, conhecido como perfil (*profile*). A parte central é similar a uma semiesfera, chamada de cúpula ou *bell*, porém existem alguns pratos praticamente sem angulação e sem cúpula, também conhecidos como *flat*. A Figura 2.9 mostra uma seção transversal de um prato qualquer, onde os termos utilizados para denominar as diferentes partes do instrumento são mostrados, conforme os conceitos utilizados por fabricantes.

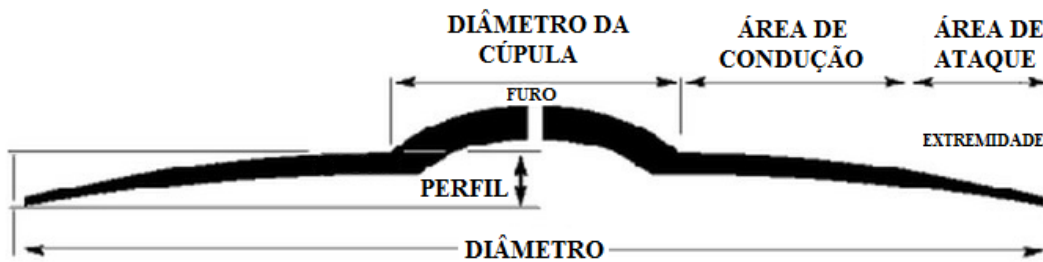


Figura 2.9 – Anatomia de um prato de percussão. Fonte: Adaptado de [62].

### 2.3.1.1 Métodos de fabricação

Os métodos utilizados atualmente para a fabricação de pratos não seguem um padrão único. Enquanto alguns fabricantes se adaptam a desenvolvimentos tecnológicos, como controle e automação dos processos, outros ainda utilizam métodos manuais aplicados desde o começo do século XX [5].

A maioria dos pratos de percussão são feitos de bronze, que é uma liga metálica de cobre e outros elementos, entre eles o estanho (Sn). Os diferentes tipos de liga são definidos através da relação de porcentagem entre os elementos, sendo o cobre o elemento presente em maior quantidade de massa. As ligas mais utilizadas para fabricação de prato são classificadas segundo a porcentagem de estanho, conforme:

- B8: (8% de Sn);
- B10: (10% de Sn);
- B12: (12% de Sn);
- B20: (20% de Sn).

Dependendo do fabricante, pequenas porcentagens de outros elementos são acrescentadas às ligas, a fim de se alterar determinadas características do material que influenciarão no timbre do instrumento. Entretanto, grande parte das empresas não divulga quais os elementos ou qual a porcentagem na composição, mas sabe-se que zinco, fósforo e prata são geralmente utilizados.

Outro tipo de material utilizado na fabricação de pratos de percussão, porém com menos frequência, é o latão, uma liga de cobre e zinco (geralmente na faixa de 38% de Zn), mais barato que o bronze.

Cada fabricante segue uma ordem de processos característicos na sua linha de produção, porém algumas etapas são comuns a grande parte das fábricas [5], como:

- moldagem: algumas fábricas produzem o próprio bronze, enquanto outras compram o material pronto em placas;
- modelagem (*Spinforming*): modelagem da cúpula e do perfil, através de uma prensa vertical, como também de uma prensa em rotação;
- martelamento: é um tipo de processo característico realizado manualmente ou com máquinas, no qual realizam-se impactos contínuos ao longo das superfícies do prato;
- torneamento (*Lathing*): o prato é montado em um torno de alta-velocidade para modelagem de sulcos na superfície. Em grande parte das fábricas as ferramentas de corte são manuais;
- têmpera: o prato é aquecido e resfriado rapidamente, causando mudanças bruscas na estrutura atômica do bronze, com o intuito de melhorar a sonoridade e durabilidade.

O controle de qualidade utilizando métricas objetivas é feito através da observação de características geométricas e de massa, durante as etapas supracitadas. Algumas fábricas, ao final do processo de produção do instrumento, possuem um controle de qualidade subjetiva, feito por um técnico treinado. Neste procedimento, utiliza-se um modelo padrão de prato como referência, onde o técnico compara cada produto antes da etapa final de embalagem.

### 2.3.1.2 Tipos de prato

Existe uma linguagem particular para diferenciar modelos de pratos, de acordo com a geometria, forma de tocar e aplicação. A Fi-

gura 2.10 mostra os três tipos principais de pratos utilizados juntamente com o conjunto da bateria, definidos como:

- Prato de Condução (*Ride*): diâmetros externos mais comuns estão na faixa de 18" até 24". Utilizado principalmente para condução de ritmo, mas também para outras aplicações que variam de acordo com o estilo do próprio músico. Geralmente toca-se impactando a ponteira da baqueta no corpo ou cúpula do prato, porém muitos são utilizados também para ataque (impacto na extremidade);
- Prato de Ataque (*Crash*): diâmetros externos mais comuns estão na faixa de 14" até 18". Geralmente utilizado para fortes impactos em transições ou conduções que necessitem peso, onde se busca uma resposta rápida de decaimento. Geralmente toca-se impactando a ponteira ou corpo da baqueta na extremidade do prato;
- Chimbal (*Hi-hat*): diâmetros externos mais comuns estão na faixa de 10" até 14". Trata-se de dois pratos sobrepostos e suspensos por uma estrutura, sendo o impacto feito com baquetas ou contato entre os dois controlado por um pedal. Também é utilizado principalmente para condução de ritmos, em paralelo com outras aplicações.



Figura 2.10 – Modelos de prato. Ataque 18" (esquerda), Condução 20" (centro), Chimbal 14" (direita). Fonte: [63].

### 2.3.1.3 Tipos de impacto

O tipo de excitação realizada em pratos de percussão é basicamente um impacto gerado por um bastão conhecido como baqueta. Em algumas ocasiões especiais, o impacto é feito entre dois pratos, mas

tal tipo de impacto não será analisado neste trabalho. Independente da amplitude do impacto definida pelo modo de tocar do músico, o tipo de baqueta utilizada possui um papel importante na definição do timbre após a excitação. Existem diferentes modelos de bastão para percussão, incluindo a baqueta, que são utilizados em pratos de percussão:

- baqueta tradicional (ponteira de madeira): tipo de baqueta mais utilizado atualmente. A estrutura é toda feita de madeira e o comprimento, diâmetro, ângulo e formato da ponteira variam em quatro modelos principais, como mostra a Figura 2.11. A variação do modelo pode alterar o espectro da força durante o impacto no prato;



Figura 2.11 – Modelos tradicionais de baqueta. Fonte: [64].

- *brushes* ou "vassourinha" (ponteira formada por uma vassoura de arames finos, como mostra a Figura 2.12-a);
- *rods* (ponteiras de espessura pequena acopladas, como mostra a Figura 2.12-b);
- *mallets* (ponteira amortecedora acoplada): geralmente possuem um corpo de madeira com uma ponteira diferenciada embutida. Existem variados materiais e formatos de ponteira, por exemplo, tem-se feltro, borracha e plástico. Um exemplo pode ser visto na Figura 2.12-c.

Em [65], o autor apresenta um estudo onde são analisadas as diferenças de massa e formato de ponteira em algumas baquetas, utilizando esferas e variando o material e o tamanho. Foram analisados os resultados de pressão sonora após serem impactadas em uma membrana de tambor.



Figura 2.12 – Outros tipos de bastão: (a) *brushes* ou vassourinha; (b) *rods* e (c) *mallets*. Fonte: [64].

Outro fator importante é o ponto de excitação no prato, ou seja, em que posição na direção radial foi gerado o impacto com a baqueta. O ponto de impacto na superfície influencia muito no timbre, determinando a faixa de frequência de radiação. A Figura 2.13 mostra pontos comuns de contato entre pratos e baquetas, durante performances musicais realizadas por bateristas.

- cúpula / campana / *bell*
- corpo / meio / *body*
- extremidade / *edge*

- corpo
- ponta



Figura 2.13 – Formas mais comuns de impacto. Fonte: Autor

## 2.3.2 Comportamento vibratório

### 2.3.2.1 Análise modal

A princípio, partiu-se do estudo de trabalhos relacionados com análise modal experimental convencional, omitindo os fatores não-lineares do comportamento do prato de percussão. Um experimento de análise modal realizado por Esposito et al. [66] foi através de escaneamento a laser, no qual, após encontrar as formas modais e frequências naturais, mediu-se a radiação sonora e observou-se quais modos estavam relacionados com o som emitido de acordo com a excitação em diferentes pontos da superfície. Outro trabalho relacionado com análise modal foi conduzido por [67], utilizando um método de interferometria com grãos postos sobre a superfície superior do prato como mostra a Figura 2.14. Foram observados modos normais com variações em duas direções: radial e angular ( $r, \theta$ ); também foram feitas comparações com modelos numéricos.

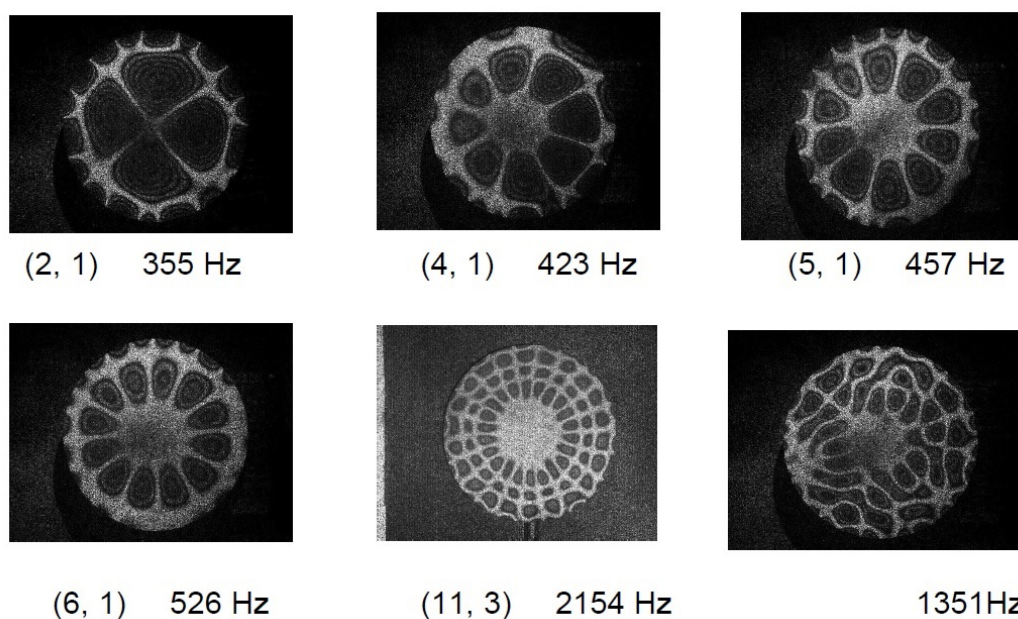


Figura 2.14 – Análise modal através de interferometria. Formas modais ( $r, \theta$ ). Fonte: [67].

Um modelo empírico proposto por [68], baseado na lei de Chladni, representa formas modais de placas circulares, conforme:

$$f_{m,n} = C_m(m + 2n)^{p_m}. \quad (2.23)$$

Considerando  $n = 0$  (sem variações na direção radial), tem-se os valores empíricos obtidos para  $C_m$ ,  $m$ ,  $p_m$ , em diferentes tamanhos e tipos de pratos, mostrados na tabela da Figura 2.15

Cymbal	$p_1$	$c_1$ (Hz)	$p_2$	$c_2$ (Hz)	$m_c$
24 in. thin	1.86	7.7	1.49	14.2	6
18 in. thin	1.75	10.1	1.56	14.1	5
	1.78	10.6	1.52	15.7	4.5
18 in. medium	1.65	13.4	1.46	18.2	4.7
	1.70	12.6	1.43	17.8	3.6
16 in. thin	1.81	10.8	1.48	18.8	5
	1.84	12.0	1.47	19.5	4
16 in. medium	1.70	13.8	1.53	18.3	5
	1.65	15.9	1.53	19.4	4.3
15 in. thick	1.47	20.6			

Figura 2.15 – Parâmetros empíricos para o cálculo das frequências naturais de pratos de percussão em variados tamanhos. Fonte: [68].

### 2.3.2.2 Vibrações não-lineares

A análise vibratória experimental de pratos de percussão foi realizada por alguns autores com o objetivo de observar um sistema que apresente um comportamento vibratório não-linear. O intuito foi analisar as características do sistema em determinados regimes ou estados de movimento. Um modelo de análise desenvolvido por Legge e Fletcher [69] utiliza a aplicação de uma força de excitação harmônica no sistema, com um crescimento da amplitude ao longo do tempo, observando-se a resposta. Um modelo de prato de percussão, conhecido como gongo, que possui um formato mais plano na direção radial e um diâmetro externo maior do que os pratos mais comuns, foi analisado. Um ponto de excitação e medição da resposta foram escolhidos. Assim, durante a medição, foi observado que, após o aumento da excitação em determinadas frequências pré-definidas, surgiram sub-harmônicos na resposta, frações inteiras da frequência de entrada. Atingindo um certo valor da amplitude harmônica de entrada, a resposta do sistema tornou-se caótica.

Outro trabalho onde foi analisada a transição de regimes dinâmi-



cos de gongos, foi realizado por Chaigne et al. [70]. A Figura 2.16 mostra gráficos da amplitude de excitação senoidal feita por um *shaker* e a resposta de aceleração ao longo do tempo, juntamente com o espectrograma em uma determinada faixa de frequências próxima à frequência harmônica de excitação. Pode-se verificar durante o tempo de análise o aparecimento de três regimes dinâmicos diferentes. O primeiro foi um regime periódico com frequências harmônicas e sub-harmônicas em relação à de excitação. Em seguida, o regime quasi-periódico acontece quando surge uma frequência com multiplicidade irracional em relação à frequência de excitação. Em uma determinada amplitude durante o regime quasi-periódico, o sistema atinge um comportamento caótico.

Em um trabalho apresentado por Touzé et al. [71], foram validadas algumas soluções para equações analíticas que descrevem um regime dinâmico caótico e realizou-se a medição da resposta de um prato de percussão. O prato foi acoplado pelo furo central sobre um excitador (*shaker*), de modo que a força de excitação considerada fosse aplicada no ponto central. Dois acelerômetros foram posicionados sobre a parte superior na superfície do prato, um na extremidade e outro localizado a uma distância do centro com o valor da metade do raio externo. Foi obtido o tempo de excitação para atingir o regime caótico em diferentes frequências de excitação.

### 2.3.3 Comportamento acústico

Alguns fabricantes como a empresa Sabian [62] afirmam que as características sonoras são determinadas pelas diferenças entre certas dimensões da estrutura. O tamanho da cúpula (altura e espessura) é responsável pelo surgimento de uma frequência tonal perceptível, criando um pico no espectro do som gerado. A variação do diâmetro externo define a faixa de frequência dos modos, relacionados com os maiores picos do espectro de resposta. Quanto maior o diâmetro, mais grave (menores frequências); quanto menor o diâmetro externo, mais agudo (maiores frequências). O diâmetro também afeta a característica de timbres conhecida como *sustain* (sustentação), que é o tempo em que o instrumento continua soando com uma amplitude considerada regime permanente na resposta. Quanto maior o diâmetro externo, maior o *sustain*.

Em um experimento realizado por Baldwin [72], obteve-se o espectro de pressão sonora devido a impactos em diferentes pontos da superfície de pratos, sendo um ponto na extremidade (*edge*) e outro

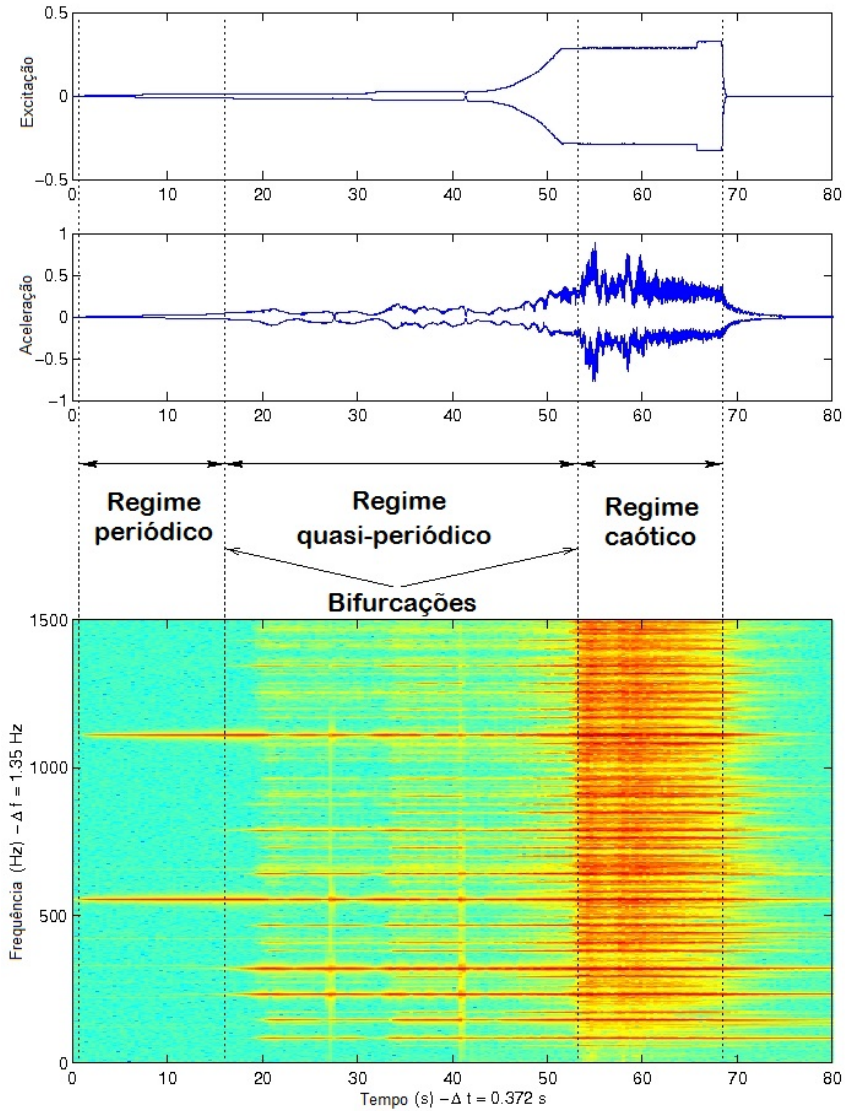


Figura 2.16 – Superior: amplitude da força de excitação harmônica ao longo do tempo. Central: amplitude da aceleração em certo ponto da superfície ao longo do tempo. Inferior: espectrograma da aceleração no ponto de resposta. Fonte:[70].

próximo ao centro (*cup*). O esquema de montagem do experimento continha um sistema de impacto composto por uma barra metálica que suportava um mecanismo com mola acoplado a um bastão com ponteira removível. Juntamente com a mola e o bastão, foi incluído um sistema de escala para regular a intensidade do impacto. Os pratos foram excitados em três diferentes amplitudes, de acordo com níveis de dinâmica musical, considerando  $pp$ (*pianissimo*)= 78dB,  $mf$ (*mezzo-forte*)= 85dB e  $ff$ (*fortissimo*)= 95dB. O bastão foi utilizado para simular um *mallet*, e a fim de avaliar diferentes materiais de ponteira, observando a

diferença nos picos do espectro de resposta sonora. Foram testados diferentes modelos de prato, para os quais foram apontadas as diferenças entre os picos mais evidentes no espectro. Além disso, foi também analisada a diferença na resposta do impacto entre dois pontos diferentes na superfície dos modelos. Os resultados mostram as principais diferenças entre geometria, tipo de ponteira e local de impacto, e podem ser encontrados no Anexo A.

### 2.3.4 Semântica do Timbre

Um exemplo de nomenclatura para o timbre de pratos foi apresentado por Conter [73], onde são identificadas algumas palavras utilizadas na linguagem entre músicos e fabricantes, juntamente com seus significados:

- *Dark* (Escuro): timbre mais grave;
- *Bright* (Brilhante): timbre mais agudo;
- *Fast* (Rápido): resposta rápida;
- *Dry* (Seco): mínimo de harmônicos;
- *Full-bodied* (Encorpado): muitos harmônicos;
- *Articulate* (Articulado): condução precisa.

Entende-se o termo harmônico, como as frequências que compõem o espectro da pressão sonora após o impacto. Martelamentos diferentes causam efeitos distintos: padrões simétricos geram uma mistura uniforme de harmônicos nos médio e médio-agudos, enquanto os aleatórios produzem harmônicos mais encorpados dentro da faixa de graves [73]. Em um sistema de classificação sugerido pela marca de pratos *Paiste* [74], tem-se que as características sonoras podem ser separadas em alguns tópicos, juntamente com adjetivos que definem as extremidades de possíveis escalas de nomenclatura:

- *Sound Color* (Coloração Sonora): *Very Bright* - *Very Dark* (Muito Brilhante - Muito Escuro ou Sombrio). Esta característica está relacionada à intensidade de baixas ou altas frequências. É importante entender que, em grande parte dos pratos de percussão, a faixa de frequências é muito ampla. Contudo, é a intensidade de certas partes do espectro que fornecem a sensação geral de

coloração sonora. Frequências mais altas geram a sensação de mais brilhante (*brighter*) e as mais baixas, uma sensação de mais escuro (*darker*);

- *Attack/Sticky Sound* (Ataque/Som da Baqueta): *Pronounced/Pingy - Spread/Washy*. Estes termos se referem ao som inicial, imediatamente após o impacto com a ponta da baqueta na superfície do prato. Esse som também incorpora a característica de madeira, que é inerente à baqueta e pode ou não ser transmitida com o som do prato. O som da ponta da baqueta se torna mais significativo na utilização de figuras rítmicas em Pratos de Condução (*Ride*). Quando esta característica torna-se muito pronunciável, utiliza-se o termo *Ping*. Ao contrário, tem-se *Spread* (Espalhado) ou *Washy*.

Outras termos referentes a características sonoras de pratos de percussão e seus respectivos significados apresentados por alguns dos maiores fabricantes podem ser encontrados no Anexo B.

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho é dividido em três partes principais: análise objetiva, análise subjetiva e desenvolvimento de modelos. A estrutura do trabalho pode ser vista na Figura 3.1. A primeira parte envolve gravação sonora, processamento de sinais e utilização de modelos psicoacústicos. Os sinais foram obtidos através de gravações do som emitido por diferentes pratos, após um impacto com um determinado tipo de baqueta. Os pratos foram fornecidos pela empresa brasileira *Krest Cymbals*, pela empresa *Batuka Groove* representante da marca turca *Impression Cymbals* e por alguns músicos que participaram do trabalho.

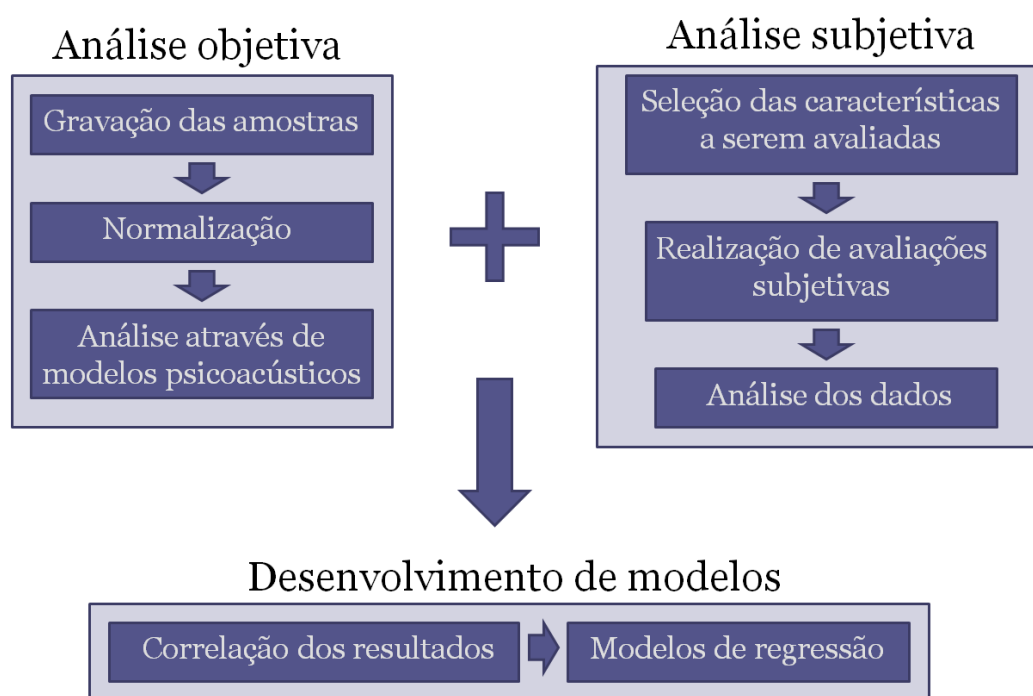


Figura 3.1 – Esquema das etapas de análise deste trabalho.  
Fonte: Autor.

Foram definidas duas formas de impacto - condução e ataque - para gravações em uma câmara semi-anecoica, utilizando uma cabeça artificial de gravação biauricular. Os impactos foram realizados por um músico percussionista. Após as gravações, todos os sinais foram normalizados em relação a um modelo de *Loudness* e, por se tratar de um sinal transiente, fez-se a normalização em relação ao percentil de 5%

de *Loudness* ( $N_5$ ). O nível de normalização utilizado foi diferente entre condução e ataque. Tendo os sinais normalizados, foram realizadas análises envolvendo diferentes modelos psicoacústicos.

Na segunda parte, sinais normalizados foram utilizados como amostras para a realização de ensaios subjetivos. Foram realizados dois tipos de ensaios: um envolvendo comparação pareada e dissimilaridades entre timbres; outro envolvendo a escala de resposta. Os indivíduos selecionados para os ensaios são músicos bateristas ativos, sendo alguns profissionais e outros praticantes por *hobby*. Foi desenvolvido um programa utilizado em ambos os ensaios, para reprodução das amostras em paralelo a questionários elaborados para ser respondidos em relação a determinadas características e diferenças. Fones de ouvido foram empregados para a reprodução sonora.

Na última etapa, buscou-se a correlação dos resultados objetivos e subjetivos, obtidos nas etapas anteriores, além da construção e desenvolvimento de possíveis modelos para determinadas características semânticas que estão relacionadas com o timbre de pratos de percussão.

## 4 ANÁLISE OBJETIVA

Neste capítulo serão apresentadas as análises realizadas através da utilização de métodos objetivos, envolvendo medições experimentais e processamento de sinais. A primeira seção apresenta experimentos iniciais analisando o comportamento vibratório e acústico da fonte a ser utilizada. Em seguida, são detalhados o procedimento e a estrutura de medição utilizados no experimento para a obtenção das amostras a ser utilizadas nos ensaios subjetivos da etapa seguinte. Por fim, são apresentados os modelos psicoacústicos utilizados e os resultados obtidos para cada amostra.

### 4.1 Comportamento da fonte sonora

Com base em alguns dos métodos e análises conduzidas nos trabalhos apresentados anteriormente na revisão bibliográfica, foi possível estabelecer critérios para medições de comportamento vibratório e acústico, realizadas com o intuito de observar a influência de diferentes partes do instrumento no som emitido. Primeiramente, fez-se uma análise modal de um prato de ataque, modelo *Krest Crash HX Series 18"*. Os detalhes desta etapa podem ser vistos no Apêndice A, que apresenta os equipamentos e procedimentos utilizados, a discretização experimental, a faixa de frequências, o espectro de resposta e as formas modais. Com os resultados da análise, observa-se que as frequências naturais mais baixas estão relacionadas com movimentos vibratórios na extremidade do prato. À medida que elas aumentam ao longo do espectro, começam a surgir movimentos na região central. A faixa de análise foi pequena, até  $800Hz$ , pois a partir desta frequência a densidade modal torna-se muito grande, como também torna-se necessária a utilização de uma malha melhor discretizada, dificultando muito o procedimento experimental.

Em seguida, foi realizada uma análise do comportamento vibratório não-linear, medindo-se a aceleração em relação a variações na força senoidal de excitação. Para tal, utilizou-se o modelo de Prato de Ataque *Krest Crash Deep Cult 18"*. Diferentes frequências foram aplicadas como força de excitação senoidal, com o intuito de observar a transição entre regimes dinâmicos. O Apêndice B mostra os equipamentos e procedimentos utilizados, bem como os resultados obtidos. Pode-se observar que, ao se aplicar uma força de excitação senoidal

com frequência semelhante a uma das frequências naturais do prato, a transição para o regime caótico acontece em um intervalo de tempo menor, quando comparada com frequências mais afastadas das frequências naturais.

Por último, um teste de impacto com baquetas do tipo *mallet* foi conduzido, medindo-se a aceleração para três amplitudes diferentes de excitação, como também o do nível de pressão sonora ao longo do tempo, medido através de um microfone posicionado a uma direção específica normal à superfície superior do prato. O modelo utilizado para este procedimento foi o Prato de Ataque *Krest Crash Deep Cult 18"* e os detalhes do procedimento, equipamentos e resultados podem ser vistos no Apêndice B. Observa-se que os resultados para os níveis de pressão sonora mostram diferenças no espectro relacionadas à influência da força na densidade (ou largura) do espectro de resposta sonora.

## 4.2 Gravação das amostras

Nesta etapa, foram selecionados dois tipos de pratos de percussão: o prato de condução (*ride*) e o prato de ataque (*crash*). Para ambos os pratos, conforme suas características, escolheu-se a forma e o ponto para impacto mais adequados. Para condução, optou-se por um impacto no corpo, em um ponto da superfície superior onde  $r = R/2$ , excitando com a ponteira da baqueta. Já para ataque, o impacto foi realizado na extremidade, com parte do corpo da baqueta. As formas de impacto podem ser vistas na Figura 2.13. Ressalta-se que, para todos os pratos, fez-se a medição com diferentes tipos de impacto, porém apenas as formas citadas acima foram selecionadas para análise neste trabalho.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram um esquema de estrutura e equipamentos utilizados no experimento. Os impactos foram realizados por um músico baterista com 1,70m de altura no interior de uma câmara semi-anecoica. No centro da câmara, foi posicionado um pedestal para o suporte dos pratos, regulado a uma altura de  $h = 1,10\text{m}$  em relação ao chão. Os pratos foram simplesmente apoiados sobre um disco de feltro na ponta do pedestal, sem a rosca superior de aperto. Trata-se de uma forma usual de apoio utilizada por músicos em que não existe efeito de engaste na direção vertical [5]. Porém em muitas ocasiões práticas também utiliza-se a rosca de aperto, podendo gerar um aumento no amortecimento do movimento do prato após o impacto.

Para a medição da pressão sonora, foi utilizado um torso *HEAD*



*Acoustics HMS III*, para gravação biauricular. A escolha do torso foi feita com intuito de simular a presença de um ouvinte em frente ao prato a ser impactado. A gravação poderia ter sido feita utilizando um gravador biauricular com fones de ouvido (por exemplo o modelo *HEAD Acoustics Squadriga*) no músico participante, porém ruídos causados por movimentos durante os impactos poderiam ser captados e possivelmente afetariam as gravações.

Não foi possível identificar na literatura um padrão a ser seguido para o posicionamento de microfones (torso) e do participante. Também não existem informações sobre o posicionamento dos modelos de pratos utilizados em relação à posição do baterista. Observa-se que muitos bateristas utilizam o prato de condução mais abaixo da cabeça e o de ataque mais acima, assim, optou-se por utilizar uma posição média entre os dois tipos analisados [5]. Estabelecidas as posições de referência, vale ressaltar que todas as gravações seguiram o mesmo padrão de posicionamento. O torso foi posicionado com o nariz alinhado no centro do prato, a uma distância de  $d = 0,80m$  e  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  rad. O músico manteve-se posicionado a mesma distância  $d$  alinhada em relação ao centro do prato, em direção oposta ao torso.

A seleção do modelo de baqueta foi arbitrária porém, devido a forte influencia no espectro de excitação, manteve-se o mesmo para todas as amostras. Foi utilizado um modelo de baqueta tradicional *Liverpool Classic Series Marfim 5B*. Utilizou-se um sensor de aceleração no corpo da baqueta para atuar como *trigger* de medições, como também para medir os picos de aceleração durante os impactos. O Apêndice C mostra a calibração para medição da força com a baqueta e resultados aproximados das forças de impacto. O método proposto para o cálculo da força medindo a aceleração da baqueta não apresentou resultados confiáveis, assim a influência da intensidade de impacto passou a ser desconsiderada nesse trabalho. A medição da pressão ao longo do tempo foi realizada em um intervalo de  $t_t = 10s$  para cada modelo de prato.

Para facilitar a comunicação entre o músico no interior da câmara e o técnico do ensaio na parte exterior, um circuito foi construído para transmitir informações através de LED's instalados dentro da câmara. Assim, o músico realizava o impacto, inibia o movimento do instrumento após o intervalo de medição e fazia a troca de modelos através da comunicação visual por meio dos sinais luminosos emitidos pelo técnico na parte externa. As intensidades de impacto não foram especificamente pré-definidas em valores numéricos de força, aceleração ou velocidade, mas sim através da linguagem dinâmica musical.

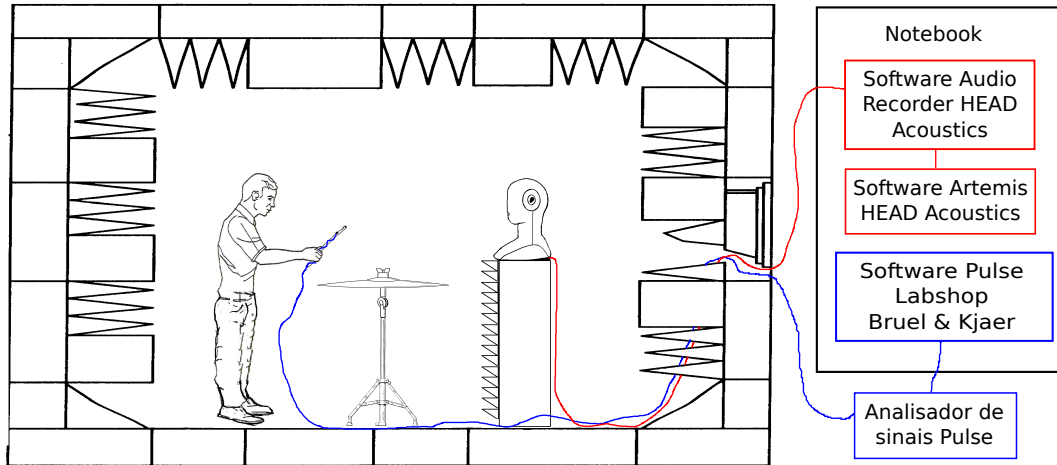


Figura 4.1 – Esquema de medição dos sinais. Azul: aceleração da baqueta durante impacto. Vermelho: pressão sonora incidente no torso e proveniente do impacto no prato. Fonte: Autor.

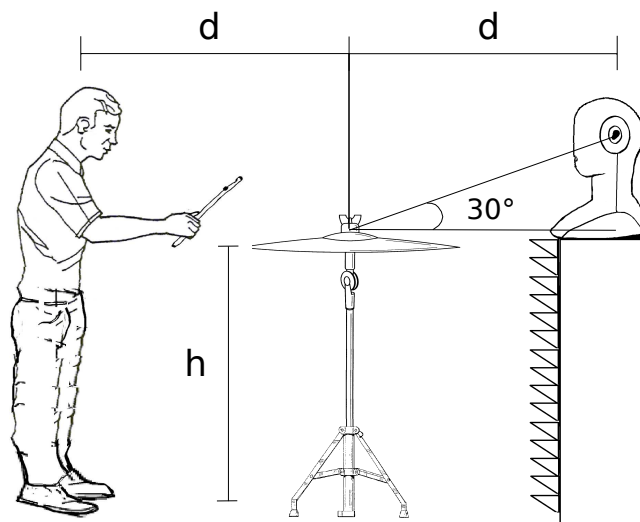


Figura 4.2 – Posicionamento do músico participante e do torso em relação ao pedestal utilizado para suportar os pratos de percussão;  $d = 0,80\text{m}$  e  $h = 1,10\text{m}$ . Fonte: Autor.

O músico que participou da medição possui uma experiência em percussão erudita, que envolve a leitura de partituras com variações de níveis dinâmicos. Desta forma, definiu-se intensidades de  $f$  (*forte*) para condução e  $ff$  (*fortíssimo*) para ataque. Existem relações entre o valor médio de *Loudness* e os níveis dinâmicos musicais ( $N_f = 16\text{sones}$ ;  $N_{ff} = 32\text{sones}$ ), como mostra [75].

Como sinais de impacto com intensidade considerável possuem

grandes variações dinâmicas, o ajuste da faixa dinâmica no torso foi efetuado para um valor máximo de 114dB. A frequência de amostragem para obtenção dos sinais foi de  $F_s = 44100\text{Hz}$ , o que se encontra dentro da faixa necessária para estudos envolvendo a percepção auditiva humana e análise espectral. Não foram utilizados filtros ou equalizadores disponíveis para correções no modelo da cabeça. Depois de captados, os sinais foram armazenados na memória do *Artemis* como sinais lineares (sem filtro), já que correções relacionadas ao canal auditivo não serão necessárias nos testes conduzidos neste trabalho, pois a reprodução sonora das amostras é feita através de fones de ouvido circum auriculares como será mostrado no Capítulo 5.

Os modelos de pratos utilizados para as gravações das amostras sonoras podem ser vistos nas Tabelas 4.1 e 4.2, separadas por tipo de amostra.

Tabela 4.1 – Pratos utilizados nas gravações de condução. Fonte: Autor.

<b>Amostra (número)</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Prato</b>	<b>Diâmetro (pol.)</b>	<b>Tipo</b>
1	Zildjian	Avedis Medium Ride	18"	Usado
2	Paiste	1000 Ride	20"	Usado
3	Sabian	B8 Pro Ride	20"	Usado
4	Impression	Jazz Ride	22"	Novo
5	Impression	Hard Medium Thin Ride	22"	Novo
6	Impression	Dark Medium Thin Ride	20"	Novo
7	Impression	Rock Ride	21"	Novo
8	Impression	Traditional Medium Thin Ride	21"	Novo
9	Paiste	502 Ride	20"	Usado
10	Paiste	502 Crash Ride	18"	Usado

Tabela 4.2 – Pratos utilizados nas gravações de ataque. Fonte:  
Autor

Amostra (número)	Fabricante	Prato	Diâmetro (pol.)	Tipo
1	Istambul	Mehmet Crash	16"	Usado
2	Zildjian	Avedis Medium Ride	18"	Usado
3	Paiste	1000 Ride	20"	Usado
4	Zildjian	Avedis Crash	16"	Usado
5	Impression	Jazz Ride	22"	Novo
6	Impression	Traditional Crash	16"	Novo
7	Impression	Traditional Medium Thin Ride	21"	Novo
8	Paiste	502 Ride	20"	Usado
9	Krest	HX Series Crash	18"	Novo
10	Krest	Deep Cult Crash	18"	Novo
11	Paiste	502 Crash Ride	18"	Usado

### 4.3 Processamento de sinais e modelos psicoacústicos

Após a obtenção de todas as gravações, separadas por tipo de impacto (condução e ataque), procedeu-se à normalização dos sinais em relação ao *Loudness* percentil  $N_5$ . O processo de normalização faz com que as características espectrais e temporais das diferentes amostras possam ser comparadas, considerando a mesma sensação de volume sonoro. Os valores selecionados para normalização foram definidos através da comparação da sensação de intensidade com leituras dinâmicas musicais apresentadas por [75], onde para um nível dinâmico *forte* ( $f$ ) tem-se  $N_5 = 16$  *sones*; para o nível *fortissimo* ( $ff$ ) tem-se  $N_5 = 32$  *sones*. A normalização foi feita baseada no modelo de *Loudness* da norma DIN4631 [76], com um algoritmo proposto por [77] utilizando o código em *MATLAB* apresentado no Anexo C.

A partir dos sinais normalizados, foram utilizados modelos psicoacústicos, juntamente com técnicas de processamento de sinais com a finalidade de analisar determinadas características dos sons gravados. Foram selecionados modelos como: *Loudness* específica, *Sharpness* e Tonalidade; e variações temporais dos mesmos. Os diferentes modelos utilizados, bem como os procedimentos seguidos para os cálculos são mostrados nas Seções 4.3.1, 4.3.4, 4.3.5, 4.3.2, e 4.3.3. Para a aplicação dos modelos utilizou-se o software *ArtemisS* versão 10.0 da *HEAD Acoustics* [78, 79]. Para os demais cálculos, como processamento e aná-

lise estatística, utilizou-se o *MATLAB* [26]. O tempo total de cada sinal analisado foi contado a partir do início de impacto até  $t_t = 4s$ . Todos os cálculos envolvendo *Loudness* com o *ArtemiS* foram realizados utilizando o método de *Zwicker* contido na norma ISO532 [80]. Um esquema do modelo para o cálculo da *Loudness* específica pelo *ArtemiS* é mostrado na Figura 4.3.

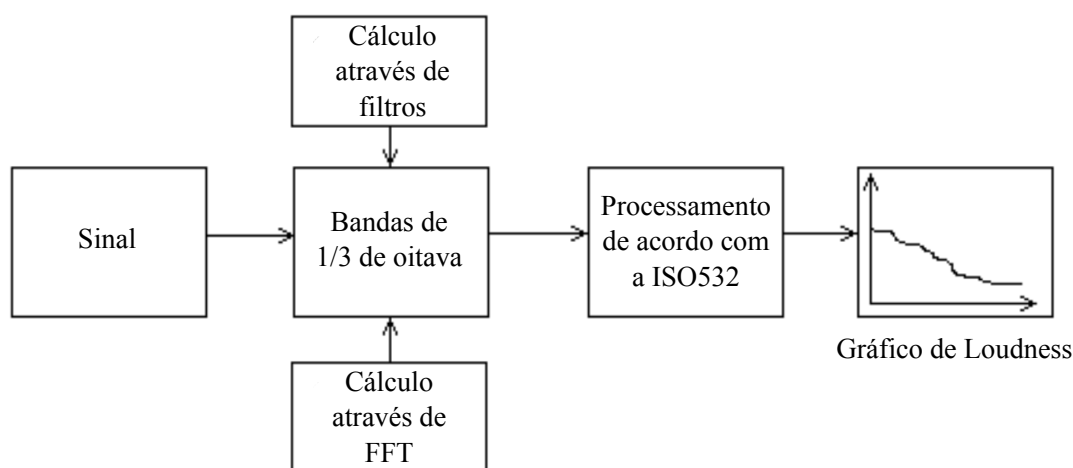


Figura 4.3 – Esquema do algoritmo utilizado pelo Artemis.

Fonte: adaptado de [78].

Para a análise através do método sugerido pela ISO532, o sinal é dividido em bandas de  $\frac{1}{3}$  de oitava. No software existem duas formas para realização deste cálculo, ou por meio de filtros ou através de uma FFT (Transformada rápida de *Fourier*). As primeiras nove bandas são divididas em três bandas críticas, para as demais não são necessárias outras formas de processamento. Os vinte níveis obtidos sofrem dois possíveis tipos de correção: para campo livre ou campo difuso, utilizando uma função de transferência característica da orelha humana. Todos os cálculos de *Loudness* neste trabalho foram feitos considerando parametrização de campo livre. Um procedimento é realizado para simular os efeitos de mascaramento que acontecem na extremidade direita de cada banda crítica. Um segundo procedimento existente no software é um algoritmo proposto pela *HEAD Acoustics*, no qual são utilizados níveis de excitação correspondentes às bandas críticas, fazendo com que frequências baixas sejam menos atenuadas, tornando assim o espectro mais discretizado (de  $dz = 1$  a  $dz = \frac{1}{5} Bark$ ). Espectrogramas da *Loudness* específica para todas as amostras medidas e normalizadas podem ser vistos no Apêndice D.

O objetivo das próximas seções foi obter valores escalares únicos

para cada amostra gravada, que representem o resultado da utilização de modelos psicoacústicos, para que seja possível uma correlação com as avaliações subjetivas feitas na etapa apresentada no Capítulo 5. Os valores obtidos são médias e desvios padrões temporais de grandezas psicoacústicas, como também intervalos de tempo que representam variações de intensidade (impulso) e densidade espectral.

#### 4.3.1 *Loudness* total de sinais filtrados

Esta análise é fundamentada na integração do espectro de *Loudness*, na qual o sinal deve passar por filtros Butterworth de 4ª ordem: passa-baixa com frequência de corte  $f_c = 500Hz$ ; passa-alta com frequência de corte  $f_c = 8kHz$ . O intuito desta análise foi de analisar a sensação de volume sonoro das faixas mais extremas do espectro de frequência, pois não existem modelos específicos que medem tais características. Utilizou-se um filtro passa-baixa, principalmente para uma faixa onde existe um número maior de notas musicais [81]. A aplicação do filtro passa-alta teve como objetivo desconsiderar sensações de volume sonoro das bandas de  $1kHz$  a  $8kHz$ , considerando apenas a faixa mais extrema de altas frequências, responsáveis por exemplo por características de sibilância [82].

Para ambos os sinais filtrados, o cálculo da *Loudness* específica é realizado através da FFT do sinal, utilizando um janelamento do tipo Hanning, com um número de pontos  $n_p = 65536$  obtendo um gráfico espectral com resolução de  $dz = \frac{1}{5}Bark$ . Assim, para cada grupo de amostras, obteve-se primeiramente uma média por banda crítica para cada modelo, entre os canais esquerdo e direito, seguida por uma integral numérica do espectro. A Figura 4.4 mostra um exemplo dos espectros de *Loudness* obtidos para o mesmo modelo de prato, com os diferentes filtros aplicados no sinal.

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram respectivamente os resultados da *Loudness* total para as amostras de condução e ataque, com a aplicação dos dois filtros. No que concerne as amostras de condução, verificou-se diferenças na faixa de  $\cong 0,5s$  em relação aos valores de *Loudness* para os filtros passa-baixa, e na faixa de  $\cong 1s$  em relação aos sinais com filtros passa-alta. Já para as amostras de ataque, as diferenças atingiram uma faixa de  $\cong 1s$  em relação aos valores de *Loudness* para os filtros passa-baixa, e até  $\cong 2,5s$  em relação aos sinais com filtros passa-alta.

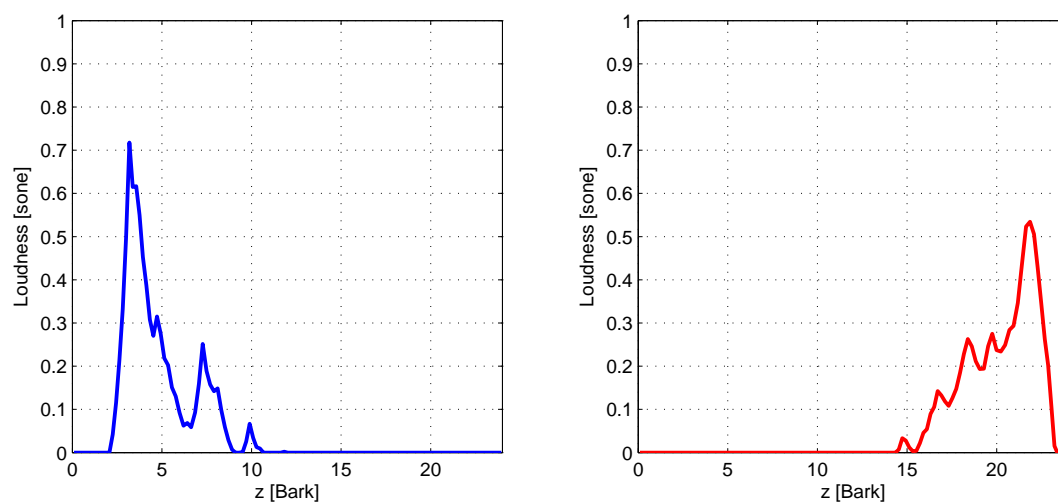


Figura 4.4 – *Loudness* específica com a aplicação de filtros na amostra 9 de condução. Esquerda: filtro passa-baixa  $f_c = 500\text{Hz}$ . Direita: filtro passa-alta  $f_c = 8\text{kHz}$ . Fonte: Autor

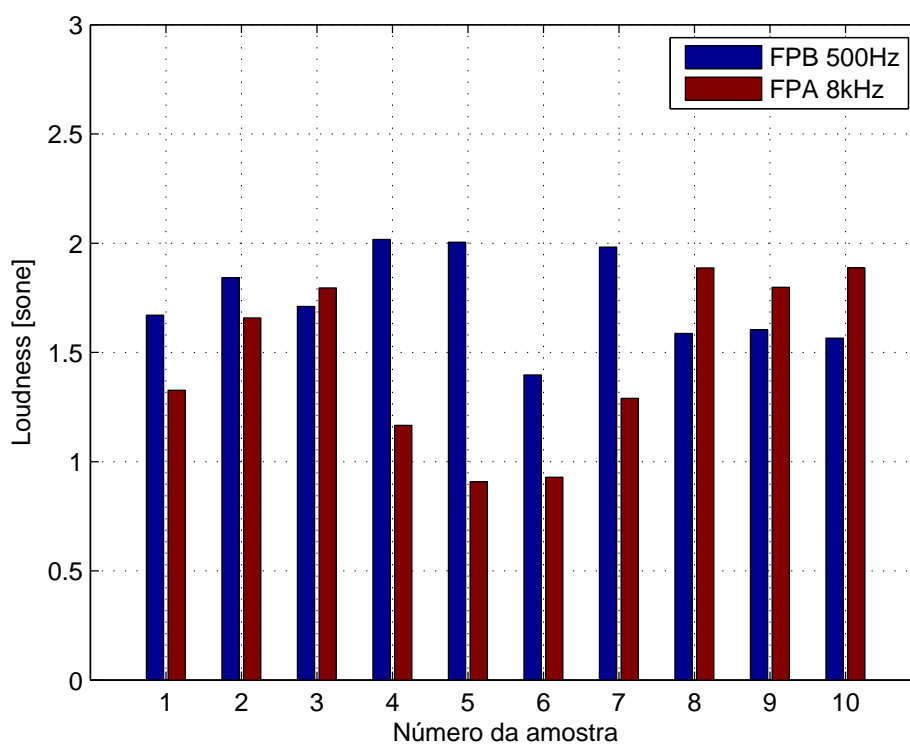


Figura 4.5 – *Loudness* média para os sinais filtrados das amostras sonoras de condução. Azul: filtro passa-baixa  $f_c = 500\text{Hz}$ . Vermelho: filtro passa-alta  $f_c = 8\text{kHz}$ . Fonte: Autor

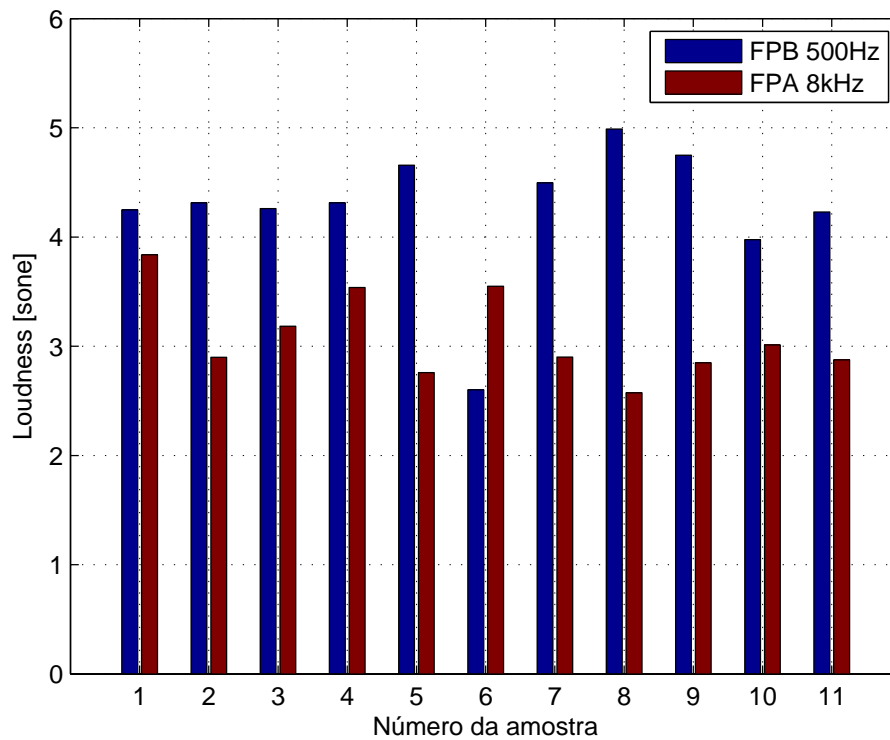


Figura 4.6 – *Loudness* média para os sinais filtrados das amostras sonoras de ataque. Azul: filtro passa-baixa  $f_c = 500\text{Hz}$ . Vermelho: filtro passa-alta  $f_c = 8\text{kHz}$ . Fonte: Autor



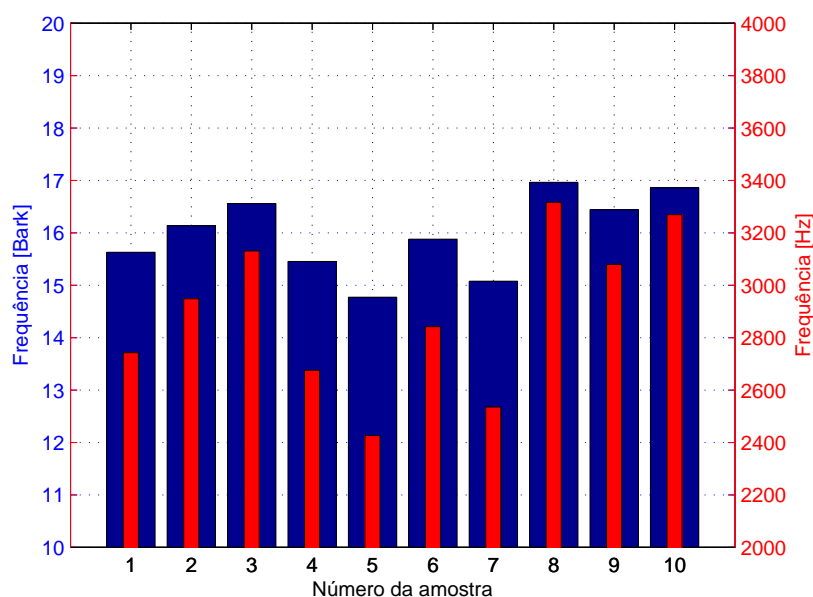


Figura 4.7 – Valores de centroide espectral para amostras de condução. Barra azul: escala Bark. Barra vermelha: escala Hz.

Fonte: Autor

#### 4.3.2 Centroide espectral de *Loudness*

A análise do centroide espectral foi realizada de duas formas distintas. Primeiramente, calculou-se o valor do centroide a partir do espectro médio de *Loudness* (o mesmo utilizado para o cálculo da *Sharpness* de von Bismarck). As Figuras 4.7 e 4.8 mostram o valor obtido de centroide espectral para amostras sonoras de condução e ataque, com frequências tanto na escala Bark quanto na escala Hz.

A segunda análise foi conduzida considerando-se a variação temporal do centroide espectral de *Loudness* para amostras de ataque, com o intuito de analisar características relacionadas a variações espectrais após o impacto na extremidade. Este tipo de análise não será apresentado para as amostras de condução pois as mesmas apresentam comportamentos muito semelhantes. Obteve-se primeiramente os dados de uma variação do espectro de *Loudness* ao longo do tempo, através do *ArtemiS*. Utilizou-se o método de Zwicker através de FFT's com número de pontos  $n_p = 256$  e sobreposição de 50%. Assim, utilizando o MATLAB, calculou-se o centroide espectral de cada espectro por intervalo de tempo obtido no tempo total analisado. Procedeu-se à suavização da curva através de médias entre vizinhanças para 50 valores

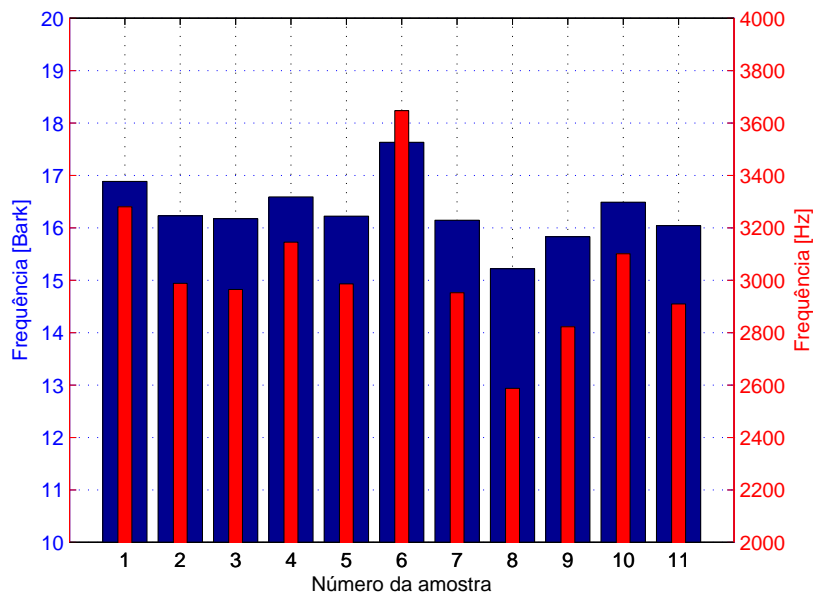


Figura 4.8 – Valores de centroide espectral para amostras de ataque. Barra azul: escala Bark. Barra vermelha: escala Hz.

Fonte: Autor

no tempo, utilizando a função *smooth* do MATLAB, como mostra a Figura 4.9. Assim obteve-se um intervalo de tempo, por amostra de ataque, até atingir o valor máximo de centroide espectral. A Figura 4.10 mostra a variação temporal do centroide de *Loudness* das amostras sonoras. O comportamento temporal do centroide espectral mostra um crescimento até atingir um valor máximo, seguido por um intervalo de decaimento. Foram calculados os intervalos temporais desde o impacto até o valor máximo de centroide obtido.

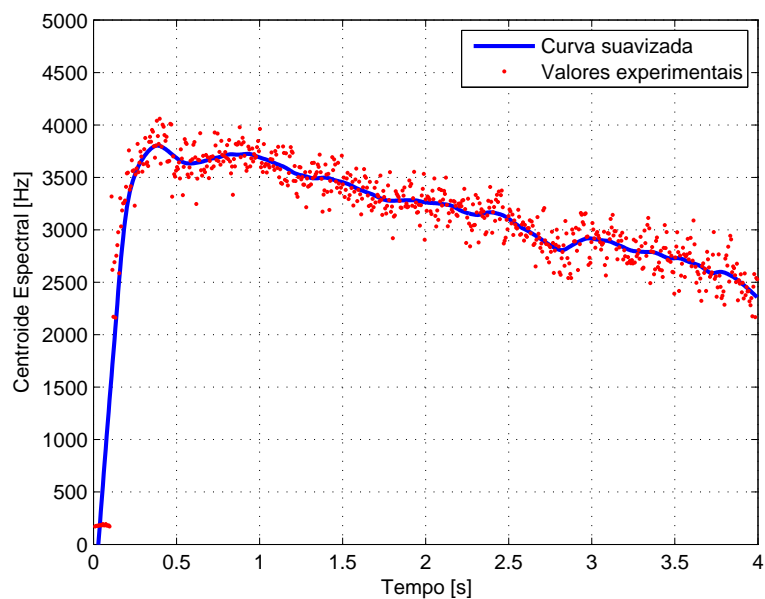


Figura 4.9 – Curva suavizada da variação do centroide espectral de *Loudness* para a amostra 6 de ataque. Fonte: Autor.

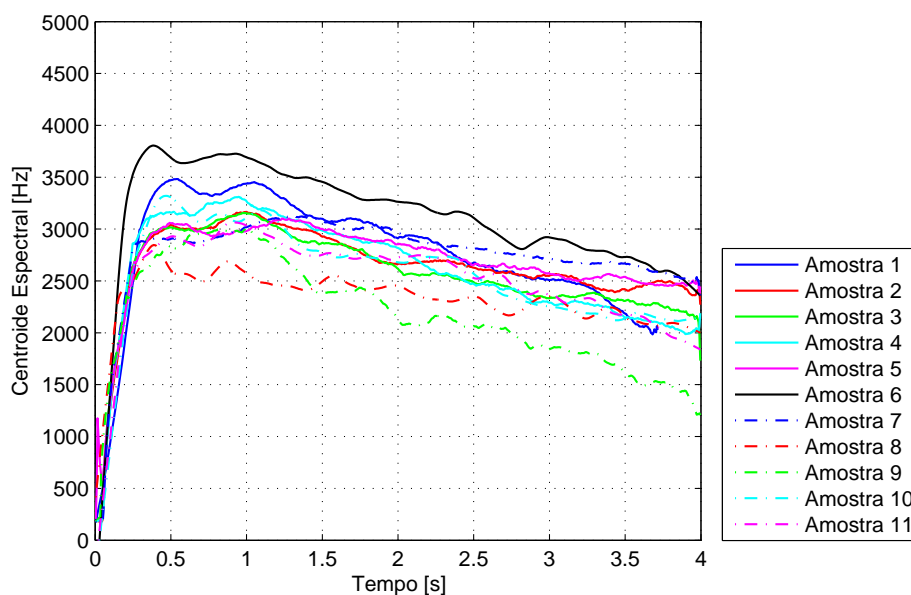


Figura 4.10 – Variação do centroide espectral de *Loudness* ao longo do tempo para as amostras sonoras de ataque. Fonte: Autor.

### 4.3.3 *Loudness* impulsiva

Para as amostras sonoras de condução, com o intuito de analisar características relacionadas ao impacto da ponteira da baqueta com o prato, uma análise do decaimento de *Loudness* após o pico máximo foi realizada. O objetivo foi determinar o intervalo de tempo a partir do pico máximo até um decaimento de 10sones. Este método foi sugerido neste trabalho baseando-se em métodos de cálculo de NPS impulsivo (decaimento em *dB*) [83]. O cálculo da *Loudness* temporal foi feito utilizando o modelo de Zwicker, através de FFTs com janelamento Hanning, com o número de pontos  $n_p = 1024$ , *overlap* de 50% e resolução de 1/1Bark.

A Figura 4.11 apresenta um exemplo da *Loudness* ao longo do tempo, onde são indicados dois pontos do gráfico: o superior como o valor máximo de *Loudness*, e o segundo ponto como um valor de *Loudness* de aproximadamente 10sones abaixo do valor máximo. As medições de *Loudness* temporal obtidas para todas as amostras de condução podem ser vistas na Figura 4.12.

A Figura 4.13 mostra os valores obtidos para o intervalo de impacto de 10sones ( $\Delta t_{\Delta N=10}$ ), para as amostras de condução. Pode-se observar que as amostras apresentam valores diferentes para o intervalo de impacto, o que deve ser considerado para a determinação das correlações a com as características apresentadas nos próximos capítulos.

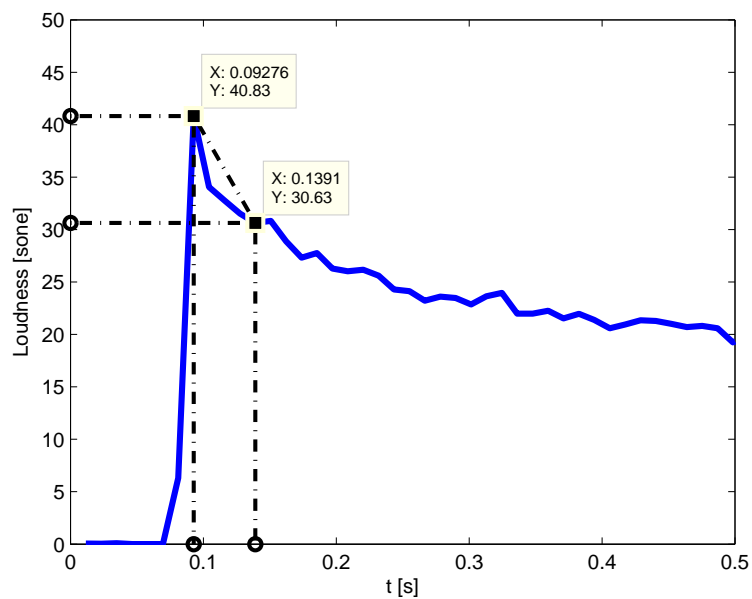


Figura 4.11 – *Loudness* temporal da amostra 3 de condução. Ponto superior: valor máximo de *Loudness*. Ponto inferior: valor de *Loudness* de aproximadamente 10sones abaixo do valor máximo. Fonte: Autor.

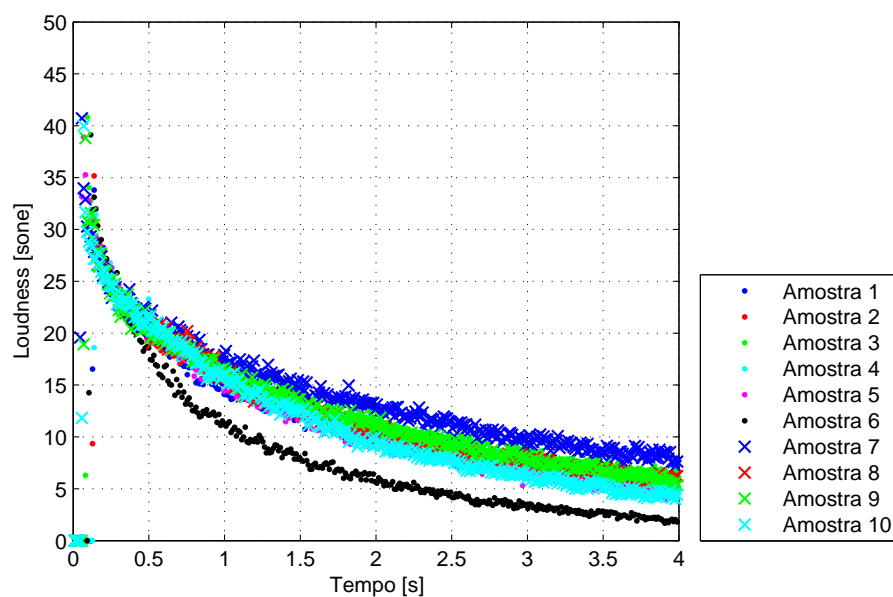


Figura 4.12 – *Loudness* temporal para amostras de condução. Fonte: Autor

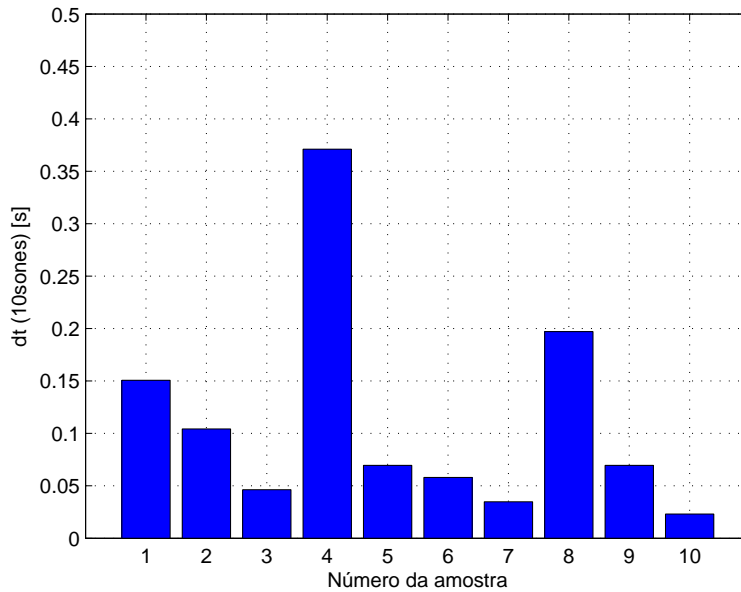


Figura 4.13 – Intervalo de impacto de 10sones ( $\Delta t_{\Delta N=10}$ ) entre as amostras sonoras de condução. Fonte: Autor.

#### 4.3.4 Agudeza (*Sharpness*)

Foram utilizados dois modelos de Agudeza (*Sharpness*). Um deles foi o modelo de *von Bismarck*, calculado pelo MATLAB a partir do espectro de *Loudness* obtido através do *ArtemiS*. O segundo foi o modelo de *Aures* obtido diretamente por meio do *ArtemiS*. Para o modelo de *von Bismarck*, obteve-se o espectro de *Loudness* utilizando o mesmo método da última seção, porém sem aplicação de filtros. Com os dados de *Loudness*, calculou-se a média por banda entre os canais esquerdo e direito [33]. Para o modelo de *Aures*, utilizou-se o padrão deferido pelo *ArtemiS*, calculando a FFT com janelamento Hanning ao longo dos intervalos de tempo, utilizando um número de pontos  $n_p = 8192$ . Com os resultados temporais obtidos através do *ArtemiS*, foi obtida a média entre os canais, e média e desvio padrão temporais.

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os resultados de *Sharpness* de *Aures* ao longo do tempo para as amostras de condução e ataque, respectivamente. As amostras de condução apresentam um pico máximo de *Sharpness* no momento do impacto, seguido por um decaimento de características exponenciais que altera de acordo com cada modelo de prato. Enquanto para a amostra de ataque, é verificado um crescimento inicial até atingir um ponto máximo, seguido por um decaimento menos

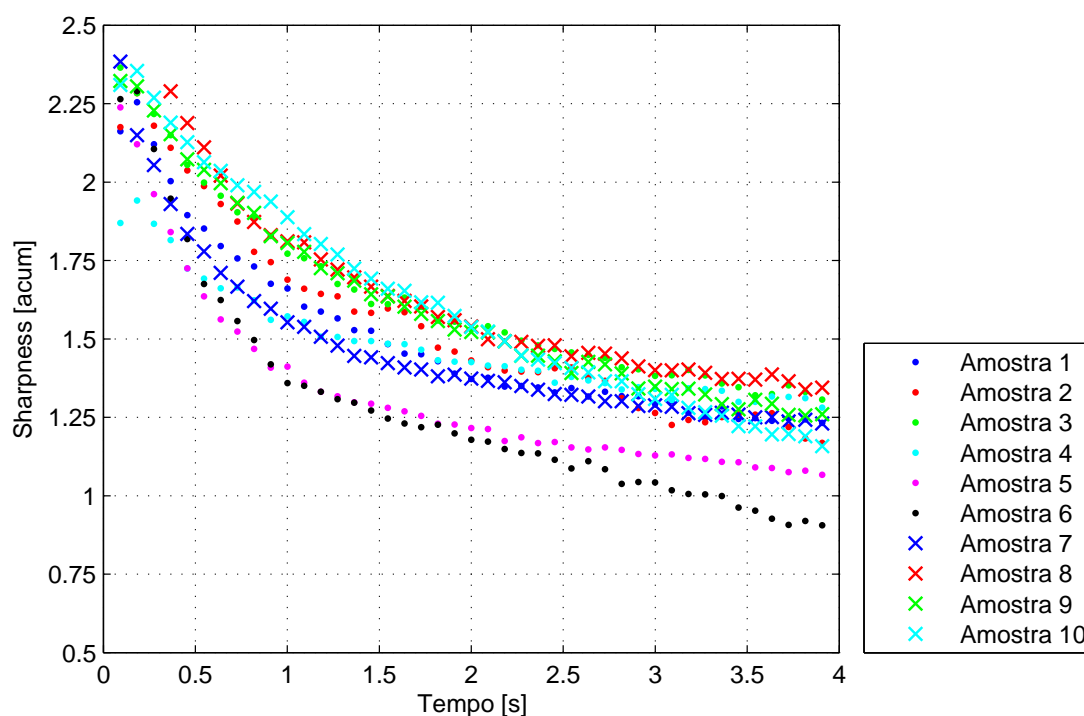


Figura 4.14 – Valores de *Sharpness* no modelo de Aures para amostras de condução. Fonte: Autor

pronunciado. Tais comportamentos demonstram que a variação espectral do sinal em regime transiente deve ser considerada, por exemplo, observando-se o desvio padrão.

A Figura 4.16 mostra um exemplo do cálculo para o mesmo prato, utilizado como amostra de condução e ataque. Assim observa-se que para um mesmo prato, o comportamento transiente das altas frequências sofre alterações de acordo com o tipo de impacto.

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram respectivamente os resultados de *Sharpness* média para as amostras sonoras de condução e ataque, com a aplicação dos dois modelos. Para as amostras de condução, os modelos de von Bismarck e Aures apresentam um resultado proporcional entre si, com pequenas diferenças entre as amostras. Para amostras sonoras de ataque, observa-se um comportamento semelhante, porém, como foi mostrado anteriormente, apresentam um desvio padrão relativo menor para o modelo de Aures ao serem comparadas com as de condução.

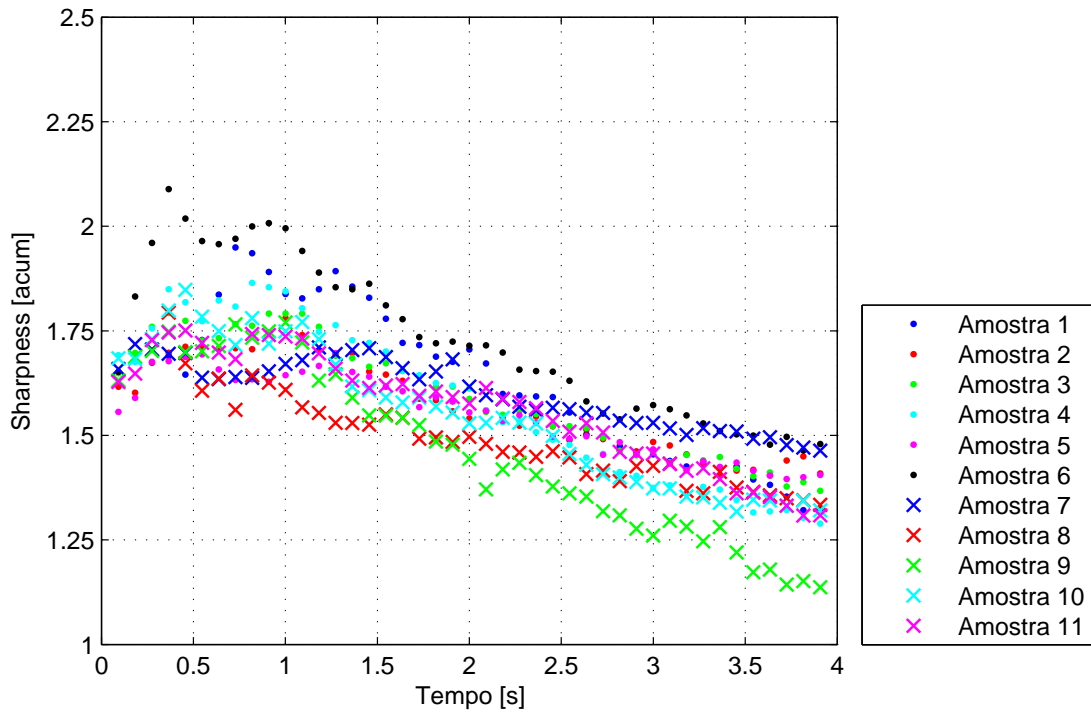


Figura 4.15 – Valores de *Sharpness* no modelo de Aures para amostras sonoras de ataque. Fonte: Autor

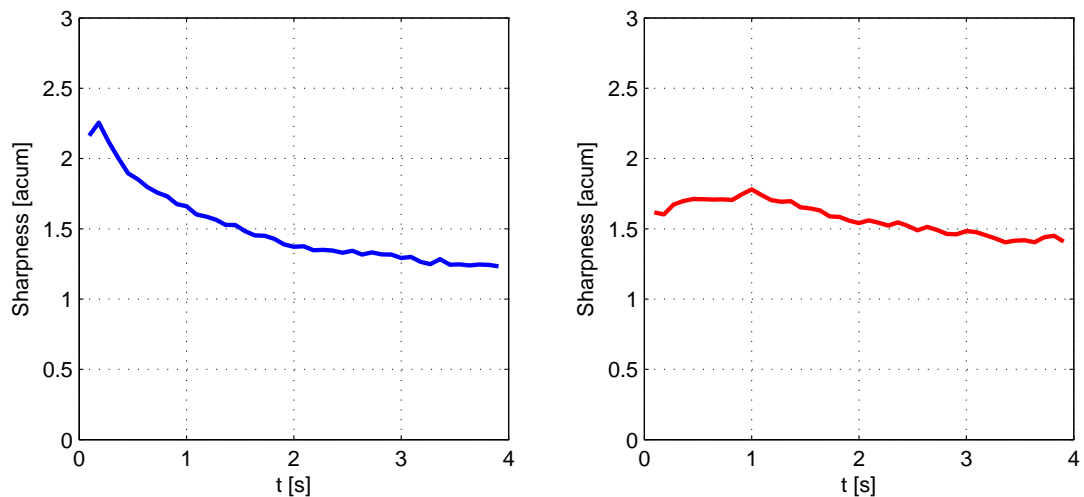


Figura 4.16 – *Sharpness* de Aures ao longo do tempo para o mesmo prato, com excitações diferentes. Esquerda: amostra 1 de condução. Direita: amostra 2 de ataque. Fonte: Autor



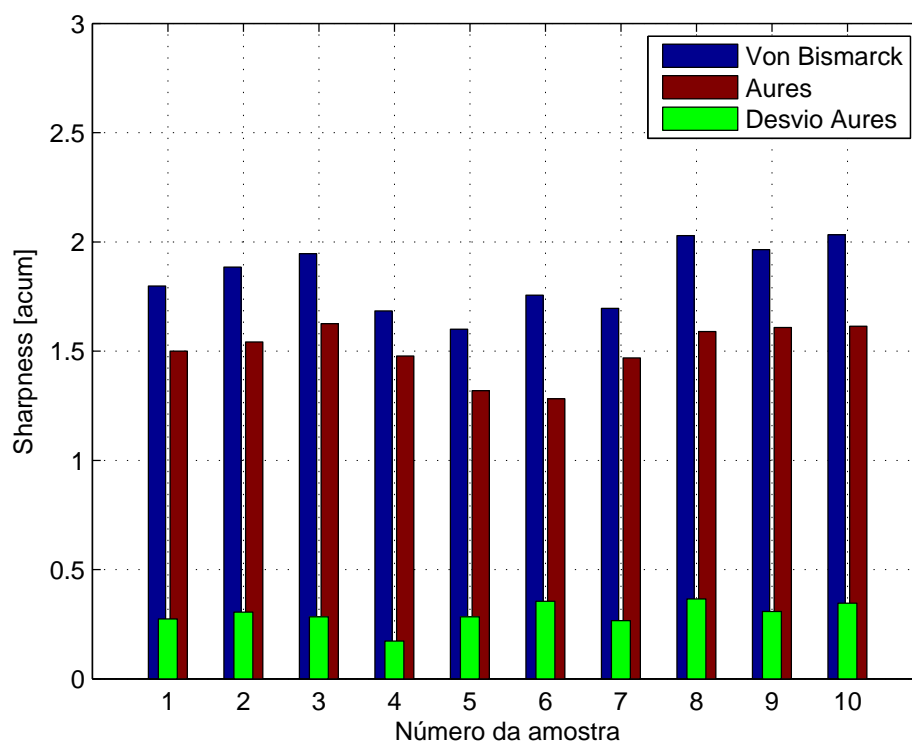


Figura 4.17 – Valores de *Sharpness* média para amostras sonoras de condução através de diferentes modelos. Azul: modelo de von Bismarck. Vermelho: média temporal para o modelo de Aures. Verde: desvio padrão temporal para o modelo de Aures. Fonte: Autor

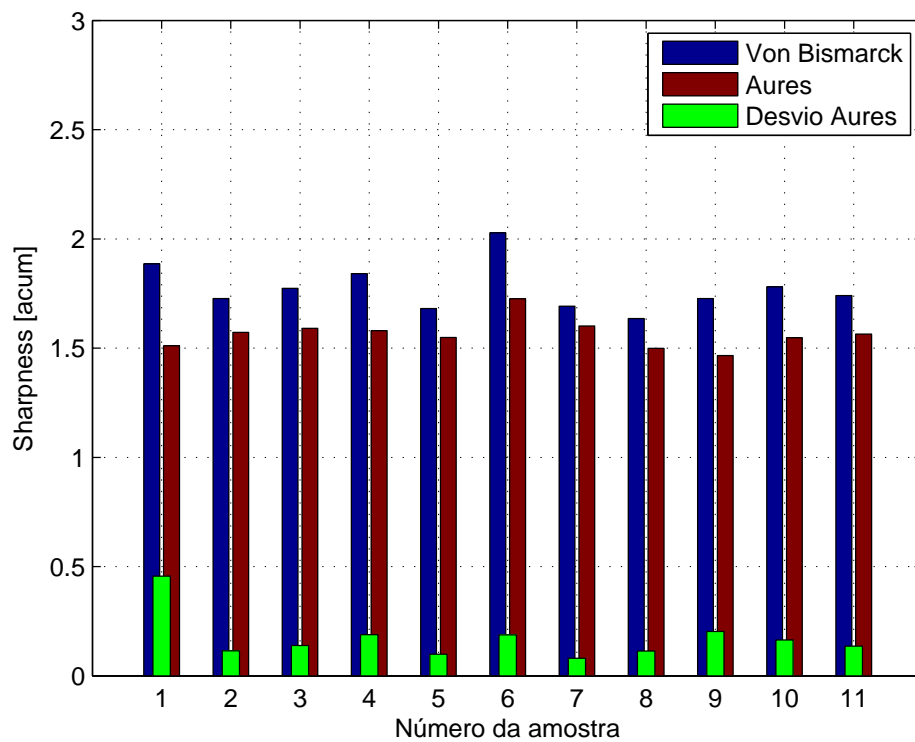


Figura 4.18 – Valores de *Sharpness* média para amostras sonoras de ataque através de diferentes modelos. Azul: modelo de von Bismarck. Vermelho: média temporal para o modelo de Aures. Verde: desvio padrão temporal para o modelo de Aures. Fonte: Autor

### 4.3.5 Tonalidade de Aures

A análise da tonalidade em pratos de percussão busca representar as sensações referentes a componentes tonais evidentes. Os cálculos de tonalidade foram realizados através do *ArtemiS*, que utiliza o modelo de Terhardt & Aures. Utilizando-se pequenos intervalos de tempo, calculou-se a FFT por meio de uma janela Hanning, com um número de pontos no espectro  $n_p = 4096$ . O objetivo do modelo utilizado é encontrar relações de amplitude maiores que 7dB entre um ponto do espectro e seu par de vizinhos, analisando cada banda crítica envolvida.

As Figuras 4.19 e 4.20 mostram o cálculo da tonalidade de Aures ao longo do tempo para duas amostras de condução e ataque, respectivamente. Na Figura 4.19, pode-se observar um valor de tonalidade baixo para a amostra 4, e maiores valores de tonalidade que crescem ao longo do tempo para a amostra 9. O mesmo comportamento pode ser observado entre amostras de ataque, na Figura 4.20.

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram os resultados de Tonalidade média através do modelo de Aures para as amostras de condução e ataque, respectivamente. Variações na faixa de  $\cong 0,5tu$  da média temporal podem ser vistas entre as amostras tanto de condução, como de ataque. Observa-se, também, a relação entre a média e o desvio padrão nas amostras: algumas amostras apresentam uma variação temporal relativa considerável e outras não. As amostras de condução apresentam maiores valores médios em relação às amostras de ataque.

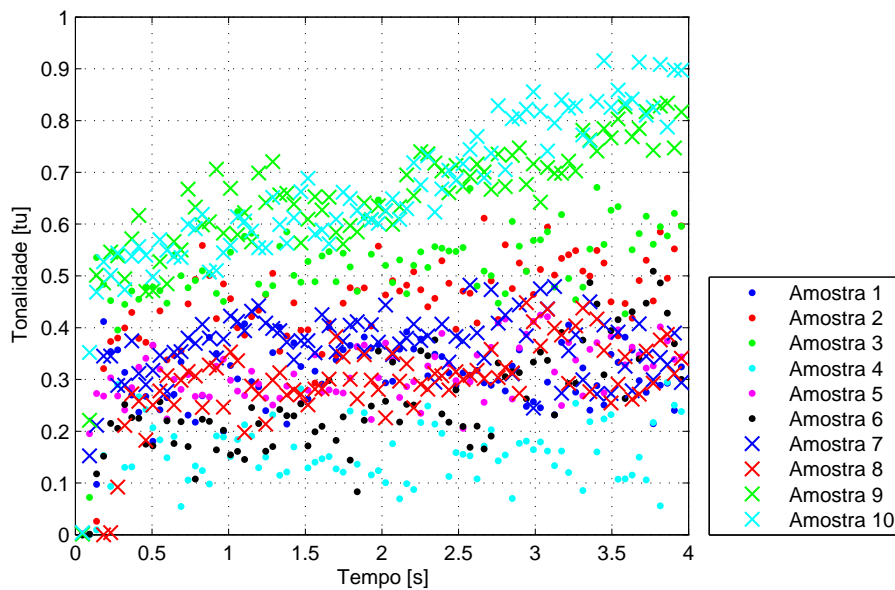


Figura 4.19 – Valores de Tonalidade no modelo de Aures para amostras sonoras de condução. Fonte: Autor

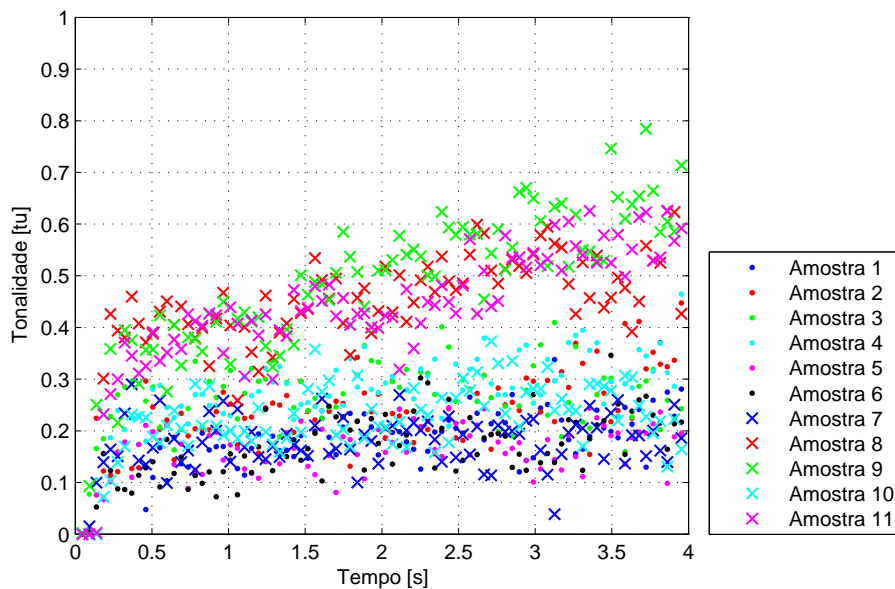


Figura 4.20 – Valores de Tonalidade no modelo de Aures para amostras sonoras de ataque. Fonte: Autor

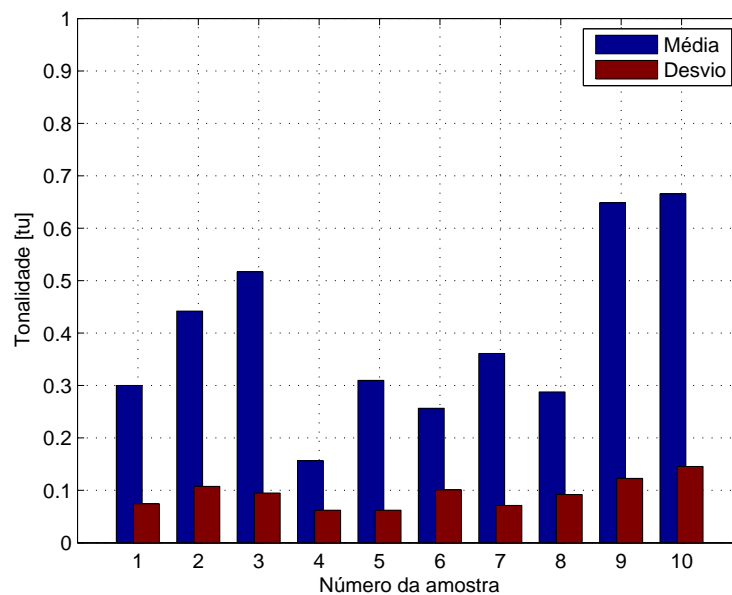


Figura 4.21 – Valores de Tonalidade total no modelo de Aures para amostras de condução. Azul: média temporal. Vermelho: desvio padrão da média temporal. Fonte: Autor

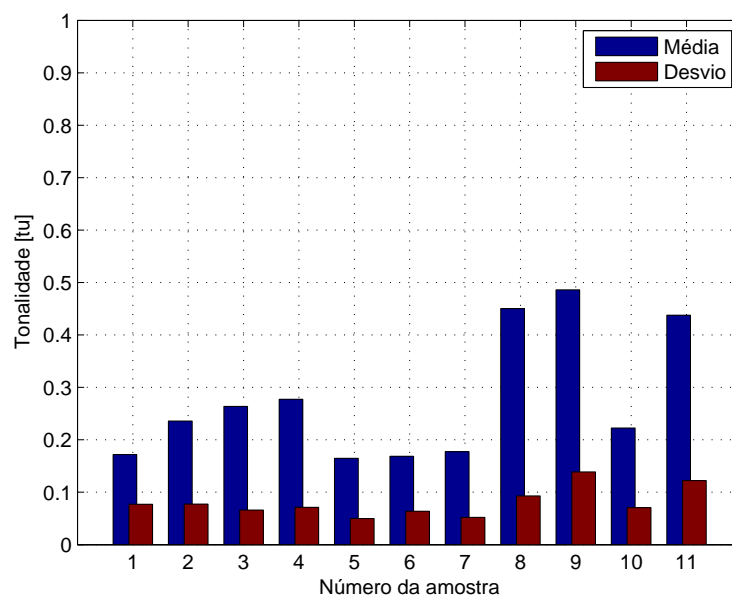


Figura 4.22 – Valores de Tonalidade total no modelo de Aures para amostras de ataque. Azul: média temporal. Vermelho: desvio padrão da média temporal. Fonte: Autor

#### 4.4 Conclusões preliminares

Os procedimentos de análise usando modelos psicoacústicos foram direcionados às análises espectrais e espectro-temporais, com exceção do decaimento temporal de *Loudness*. Análises espectrais considerando os sinais em regime permanente foram feitas no cálculo da *Loudness*, da *Sharpness* de von Bismarck e do centroide espectral. O fato de se calcular o espectro médio do tempo total faz com que características dinâmicas durante o intervalo de impacto não sejam consideradas, mas sim as componentes tonais ou bandas críticas, que se mostram mais evidentes durante todo o sinal sonoro observado (os 4 segundos de cada amostra).

A variação temporal do centroide de *Loudness*, bem como da tonalidade, observada em algumas amostras de ataque, mostra como a densidade espectral varia consideravelmente desde o impacto até o final do intervalo em alguns pratos. Verificou-se que componentes tonais de frequência mais baixa se tornam mais evidentes a partir da etapa de decaimento do envelope temporal, pois ocorre um decaimento no valor do centroide espectral de *Loudness* como também um crescimento no valor de Tonalidade. Um exemplo de amostras sonoras de condução e ataque gravadas com o mesmo prato mostram como o impacto gerado com a ponta da baqueta acarreta em uma variação considerável da *Sharpness* ao longo do tempo, diferente do impacto gerado para a amostra de ataque, onde a diferença na forma e ponto de excitação faz com que frequências mais baixas tornem-se mais evidentes, mantendo a *Sharpness* mais constante ao longo do intervalo.

Variações no espectro sonoro ocorrem em um mesmo modelo de prato e com a mesma baqueta, mas sob diferentes tipos de impacto, podem ser observadas através de comparações entre as funções resposta em frequência para os dois locais da excitação. Ao observar os trabalhos relacionados com a análise modal de pratos, bem como aquela realizada neste trabalho e apresentada no Apêndice A, a diferença na densidade do espectro normalizada para os dois tipos de excitação pode estar relacionada com as formas modais mais evidentes para os locais de excitação. Observa-se que, nas primeiras formas modais, relacionadas às frequências mais baixas, o movimento dos pratos acontece apenas nas extremidades. Quando a frequência cresce, as formas modais começam a movimentar as partes mais centrais do corpo. Por fim, os primeiros modos que movimentam apenas a região da cúpula ocorrem em frequências mais altas, pelo fato de ser uma região com maior espessura, acarretando em uma maior rigidez.

O campo de pressão sonora, gerado após o impacto do prato, apresenta relação direta com as formas modais excitadas. Para uma excitação com a ponta da baqueta no corpo do prato, o som emitido possui um espectro no qual as frequências mais evidentes encontram-se acima da faixa de 500Hz, que está diretamente relacionado com o ponto no espectro onde ocorre o surgimento das primeiras formas modais em que acontece o deslocamento das partes mais centrais do prato. Para o ataque, a excitação é feita na extremidade do prato e com o corpo da baqueta, onde ocorre o movimento das primeiras formas modais. Isso faz com que as frequências mais baixas, de característica tonal se tornem mais evidentes no espectro de resposta. Mas também surge um aumento na densidade do espectro para altas frequências, como consequência do comportamento vibratório não-linear observado em pratos de percussão. Como a força de impacto é muito grande, ocorrem grandes deslocamentos na extremidade ao serem comparados com a espessura do prato. Assim, a grande quantidade de energia imposta nos primeiros modos acaba sendo transferida para os modos seguintes (como mostrado no Apêndice B).

O intuito da utilização dos modelos psicoacústicos escolhidos foi apenas observar os sinais sonoros obtidos para diferentes pratos, sem focar na relação dos resultados com características de geometria e material, mas sim, para encontrar uma relação no próximo capítulo com características de timbre observadas por músicos.





## 5 ANÁLISE SUBJETIVA

Neste capítulo são apresentadas as análises envolvendo a parte de acústica subjetiva. Para tal, foram realizadas avaliações com sujeitos (músicos bateristas) para julgamento das amostras sonoras introduzidas no Capítulo 4. A primeira seção detalha os métodos utilizados e o modelo de interface relacionado. Em seguida, são apresentados o ambiente de ensaio e os equipamentos utilizados durante as etapas do ensaio. E, para concluir, a última seção trata da análise dos dados obtidos das respostas de cada participante.

### 5.1 Método, procedimento e interface de ensaio

A princípio, a etapa de análise subjetiva teve por objetivo a realização de uma avaliação de dissimilaridades entre timbre, envolvendo comparações pareadas entre as amostras sonoras gravadas para utilização do método MDS. Pelo fato de a comparação ser feita para o mesmo tipo de instrumento, o andamento da avaliação se tornou cansativo para os participantes, já que o número de amostras para cada tipo de impacto era em torno de 10, resultando em um mínimo de 45 comparações necessárias.

Outra dificuldade foi a construção de um significado geral para o termo timbre para um mesmo tipo de instrumento. A partir do momento em que não se define exatamente qual característica está sendo comparada entre os modelos, o julgamento da dissimilaridade entre eles tornou-se confusa. Este primeiro ensaio contou com a participação de oito músicos bateristas e os resultados para o método MDS encontram-se no Apêndice E, onde são apresentadas as dimensões obtidas para as diferenças entre os modelos analisados.

O ensaio principal foi dividido em duas partes, segundo o tipo de impacto, ou seja, uma relacionada com as amostras de condução e a outra com as amostras de ataque. Cada uma das partes foi dividida em três características semânticas relacionadas ao timbre. As características selecionadas para análise neste trabalho foram escolhidas de forma estruturada utilizando análises semânticas. Através de entrevistas com 15 bateristas da região de Florianópolis, foi possível elaborar uma lista do vocabulário utilizado. Em seguida, foram igualmente selecionados descritores apresentados por fabricantes de pratos, geralmente disponíveis no próprio site das empresas, como mostra o

Anexo B. Da comparação entre as duas fontes de informação, foram selecionadas diferentes descritores conforme o tipo de prato.

Um esquema da divisão do ensaio pode ser visto na Figura 5.1, no qual identifica-se os seguintes termos para condução: *Brilhante* (*Bright*), *Dark* (Opaco, Sombrio, Profundo), *Ping* e *Qualidade*; já para ataque, tem-se os termos: *Brilhante* (*Bright*), *Dark* (Opaco, Sombrio, Profundo), *Abertura* e *Qualidade*. Assim, cada parte foi dividida em quatro etapas. A última característica, denominada genericamente *Qualidade*, refere-se ao gosto pessoal do músico em relação ao timbre. Como não existem referências objetivas para as características avaliadas neste trabalho, optou-se por realizar os testes em grupos, onde os participantes estabeleciam suas próprias referências. Para cada grupo de uma determinada característica, o participante foi instruído a estabelecer referências.

O método utilizado para avaliação de cada característica foi a escala de resposta, na qual, para cada amostra de sinal ouvido, o participante enumerava de 0 a 10 o grau do determinado aspecto que estava sendo analisado. Devido à ausência de níveis de referências para as características apresentadas, separou-se cada uma delas em dois grupos diferentes de 5 amostras (Grupo 1 e Grupo 2), totalizando 10 amostras sonoras por característica. No início de cada ensaio, o participante foi instruído a atribuir a nota máxima à amostra que apresentasse o atributo de forma mais impactante, e a nota mínima à amostra que apresentasse o atributo na sua forma menos pronunciada. Por exemplo, com relação à característica *Brilhante*, deveria ser atribuída ao mais brilhante do grupo a nota 10; ao menor, a nota 0; aos demais, uma nota relativa a esses extremos. Assim, cada grupo de amostras possui uma referência própria, podendo-se comparar dois grupos diferentes, relacionados à mesma característica. A ordem dos ensaios pode ser vista na Figura 5.1.

A Figura 5.2 mostra o modelo da interface desenvolvida no software *Labview*. No topo, pode-se visualizar qual característica a ser observada. Logo abaixo aparecem cinco barras, referentes às amostras a ser ouvidas. As barras podem ser deslizadas, até atingir o valor necessário para o nível escolhido, sendo a extremidade esquerda 0 e a direita 10. O sujeito, durante o teste, tem a oportunidade de ouvir cada amostra quantas vezes achar necessário, até criar suas próprias referências para determinado grupo, em relação à determinada característica. Os modelos de pratos utilizados como amostra são listados por grupo nas Tabelas 5.1 e 5.2, para as amostras de condução e ataque, respectivamente. A ordem e escolha dos pratos por grupo foi determinada

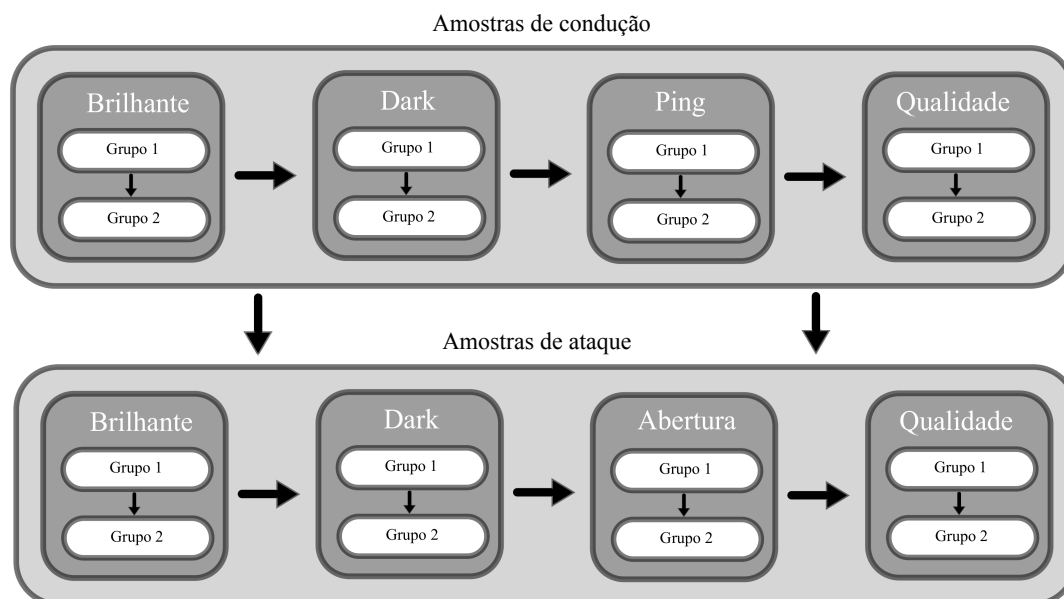


Figura 5.1 – Divisão das etapas e procedimento do ensaio subjetivo. Fonte: Autor.

aleatoriamente, com o intuito de encontrar relações entre características através do julgamento de diferentes grupos e ordens de amostras sonoras.

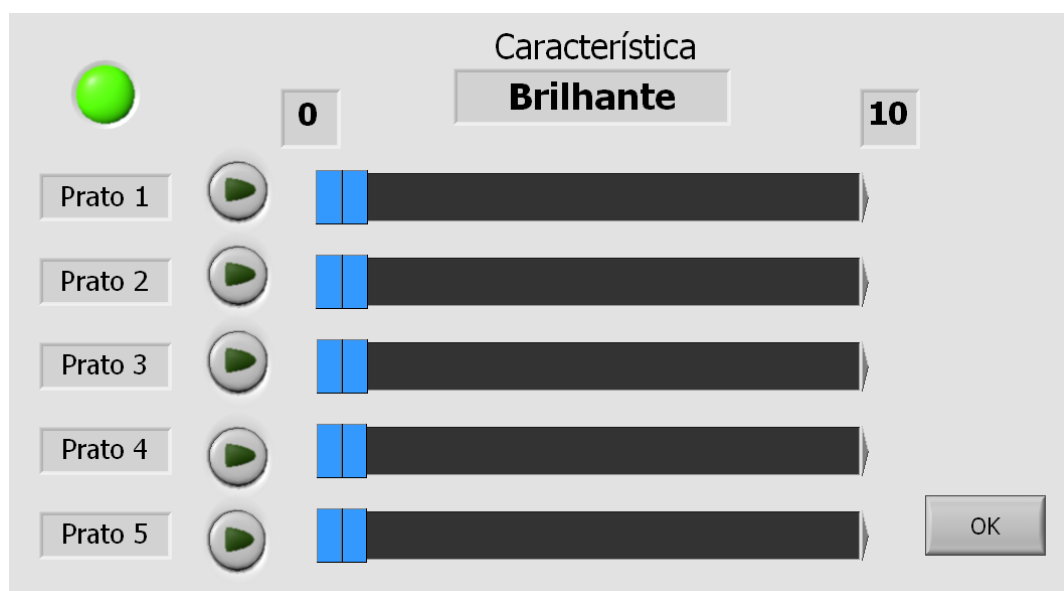


Figura 5.2 – Interface do programa utilizado. Etapa de avaliação da característica *Brilhante* para um dos grupos de amostra. Fonte: Autor.

Tabela 5.1 – Amostras sonoras de condução utilizadas nas etapas do ensaio subjetivo. Números dos modelos mostrados na Tabela 4.1.

Característica	Brilhante		Dark		Ping		Qualidade	
	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>Grupo</b>								
<b>Prato 1</b>	5	6	6	10	4	6	4	6
<b>Prato 2</b>	4	7	8	3	8	1	8	1
<b>Prato 3</b>	1	2	9	1	5	7	5	7
<b>Prato 4</b>	3	9	2	4	2	3	2	3
<b>Prato 5</b>	8	10	5	7	9	10	9	10

Tabela 5.2 – Amostras sonoras de ataque utilizadas nas etapas do ensaio subjetivo. Números das modelos mostrados na Tabela 4.2

Característica	Brilhante		Dark		Abertura		Qualidade	
	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>Grupo</b>								
<b>Prato 1</b>	8	11	8	11	8	6	8	6
<b>Prato 2</b>	9	5	9	7	10	9	10	9
<b>Prato 3</b>	7	3	5	2	5	2	5	2
<b>Prato 4</b>	10	4	10	4	4	7	4	7
<b>Prato 5</b>	6	1	6	1	11	1	11	1

## 5.2 Equipamentos e ambiente de teste

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios subjetivos (*Hardware* e *Software*) são apresentados a seguir:

- Interface *Head Acoustics PEQ V*
- Fones de Ouvido *Sennheiser HD600*
- Software *National Instruments Labview 11*
- Software *Head Acoustics Audio Recorder*
- Notebook *Toshiba - Windows XP*

A Figura 5.3 mostra o esquema de montagem dos equipamentos. Os fones de ouvido *Sennheiser HD600* utilizados foram calibrados para uma das saídas da Interface *Head Acoustics PEQ V* e a cabeça artificial utilizada, com o objetivo de se obter uma resposta plana para

a saída dos sinais de áudio, reproduzindo-os da mesma forma em que foram captados. O programa para realização do teste e obtenção de resultados obtidos nas avaliações feitas pelos participantes foi elaborado através do *Software Labview*, associado ao *Software Head Acoustics Audio Recorder*, responsável pela reprodução dos sinais sonoros através da Interface *Head Acoustics PEQ V*.

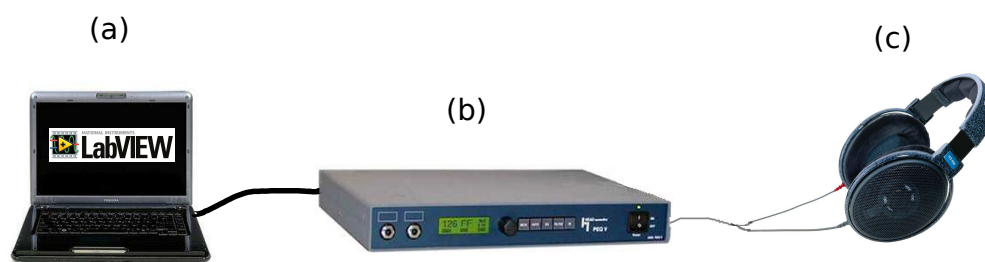


Figura 5.3 – Equipamentos e suas respectivas conexões utilizados durante as avaliações subjetivas: (a) Notebook com software Labview; (b) Interface de Áudio *Head Acoustics PEQ V*; (c) Fone de ouvido *Sennheiser HD600*. Fonte: Autor.

O ambiente no qual foi realizado o ensaio subjetivo foi uma das salas de reunião do laboratório, composta por uma mesa central e um sistema de ar condicionado para refrigeração do local. Por motivos de possíveis incômodos, como também dificuldades de percepção devido ao ruído, antes de cada teste perguntou-se ao participante se desejaria manter o ar condicionado ligado. Um pesquisador envolvido no trabalho acompanhou todos os ensaios, permanecendo na sala em silêncio, com o objetivo de explicar inicialmente o teste, tirar dúvidas durante a realização e resolver possíveis problemas técnicos com os equipamentos utilizados. Antes dos ensaios, cada participante assinou um termo de consentimento livre e esclarecido, proveniente do conselho de ética da universidade, mostrando que não houve problemas durante a realização.

### 5.3 Características dos participantes

No total, treze sujeitos participaram dos ensaios, todos do sexo masculino; onze de nacionalidade brasileira e dois de nacionalidade chilena (ambos residem no Brasil e dominam o português); músicos bateristas (ou percussionistas), sendo oito praticantes por hobby e cinco como profissão. Na Figura 5.4 são apresentadas duas características do

grupo de participantes: a distribuição de faixa etária, no mínimo vinte e máximo quarenta e cinco anos; assim como a distribuição do período de tempo que mantém contato com o instrumento, em anos.

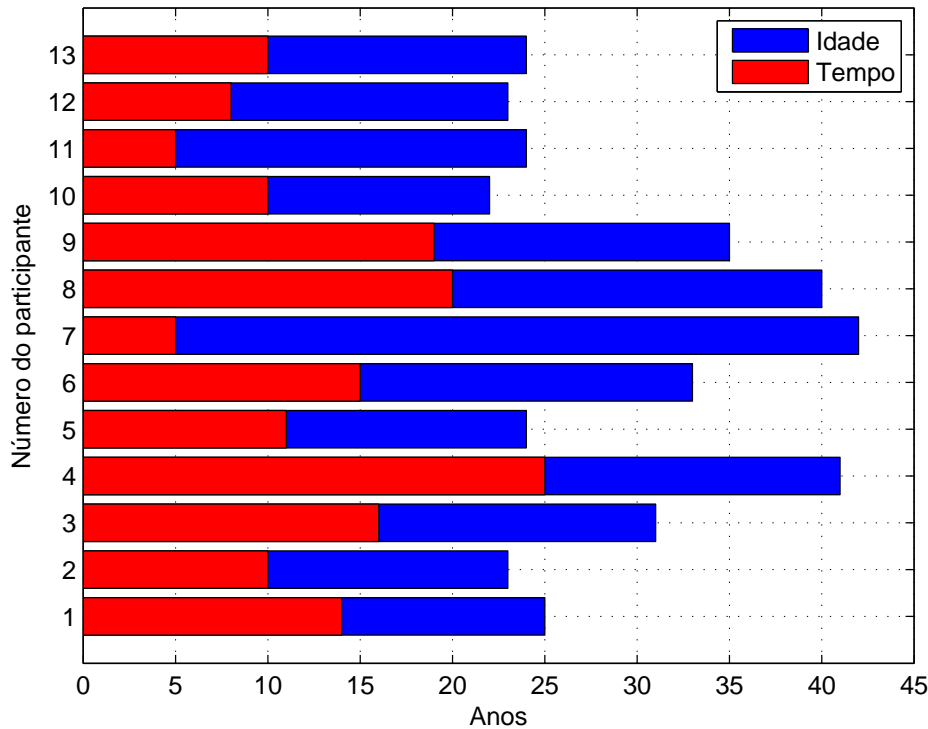


Figura 5.4 – Idade e tempo de convívio com pratos de percussão dos sujeitos participantes das avaliações. Fonte: Autor.

## 5.4 Análise de dados

Com as respostas obtidas dos participantes, foram realizadas análises estatísticas a fim de avaliar a concordância entre os sujeitos. Primeiramente, plotou-se a distribuição das respostas das avaliações através de diagramas de caixa, mostrando as medianas, quartis, faixa de quartis e possíveis valores discrepantes. Os diagramas de caixa podem ser vistos para os grupos de condução e ataque nas Figuras 5.5 e 5.6, respectivamente.

Para as amostras de condução, os grupos referentes à característica *Qualidade* apresentaram os maiores intervalos de quartis, o que implica em maior diferença entre respostas. Nos demais grupos de características de condução surgiram alguns valores discrepantes, porém

as distribuições estatísticas se mostraram mais uniformes, devido a uma maior concordância entre os sujeitos. Para as amostras de ataque, os intervalos das distribuições estatísticas foram mais abrangentes para grande parte dos grupos avaliados. Contudo, diferente das amostras de condução, os grupos relacionados à *Qualidade* apresentaram uma melhor concordância. O Apêndice F mostra por meio de histogramas a distribuição das respostas dos sujeitos, por grupos de amostras de condução e ataque.

Para uma visão mais precisa e resumida da concordância entre sujeitos, relacionando-os entre cada grupo avaliado, foi calculado o coeficiente de correlação intraclasse (ICC). Pode-se considerar um boa concordância ao obter valores de  $ICC > 0,75$  [59]. Os resultados podem ser vistos para os grupos de condução e ataque, respectivamente, nas Figura 5.7 e Figura 5.8. Pode-se observar que as três primeiras características (*Brilhante*, *Dark*, *Ping*) apresentam maiores valores de ICC para os grupos de condução, com exceção da característica *Qualidade*. Nas amostras de ataque, apenas um grupo da característica *Dark* apresentou uma concordância perto do critério esperado, os demais grupos encontraram-se abaixo deste valor. Ao se comparar a concordância da característica *Qualidade* entre os dois tipos de amostra, os valores obtidos para os grupos de ataque foram consideravelmente superiores àqueles obtidos para os grupos de condução, porém ainda abaixo do critério esperado ( $ICC < 0,75$ ).

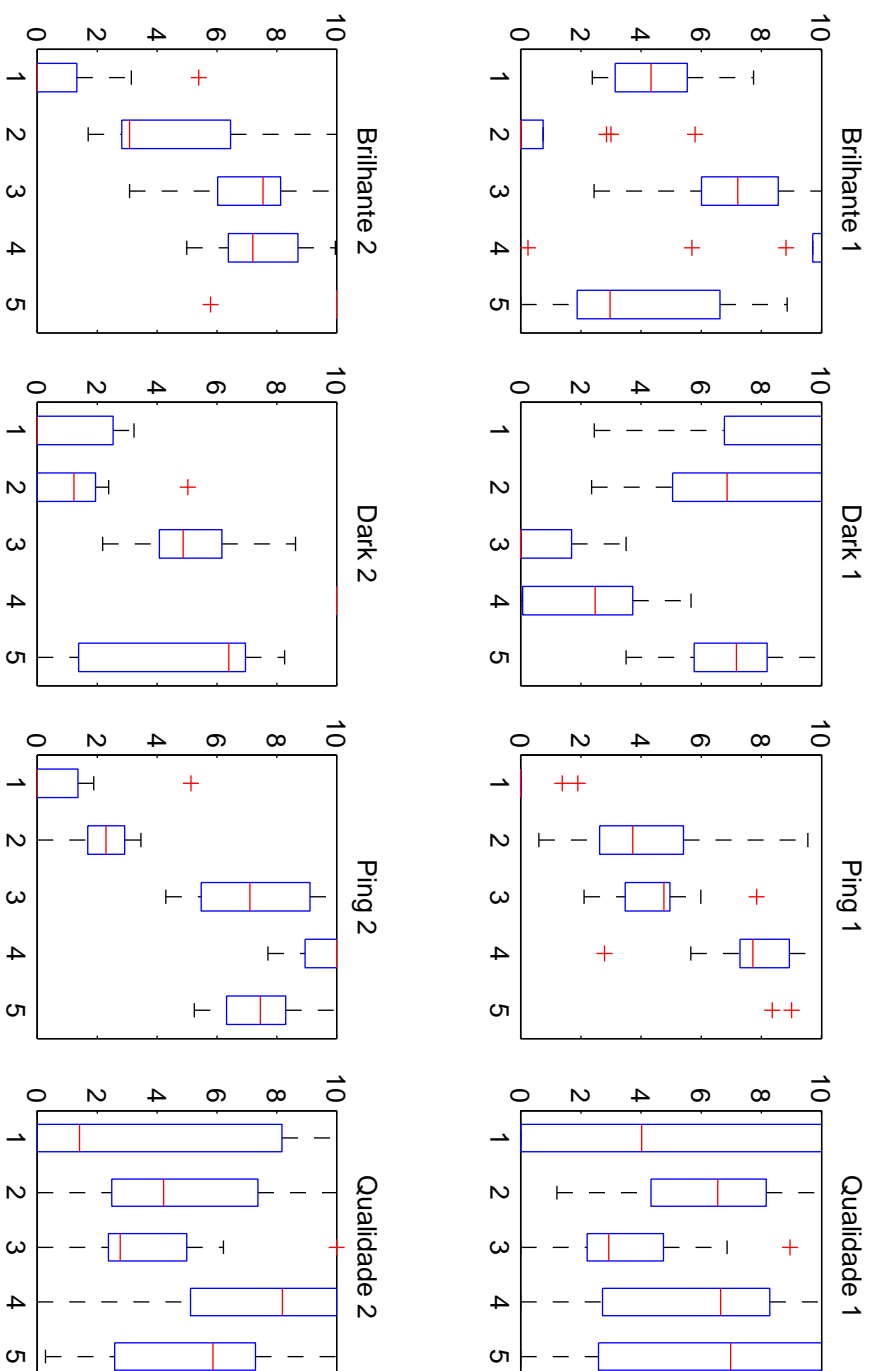


Figura 5.5 – Diagramas de caixa para as avaliações de amostras sonoras de condução. Abcissa: amostras sonoras. Ordenada: grau relativo atribuído à característica. Fonte: Autor.



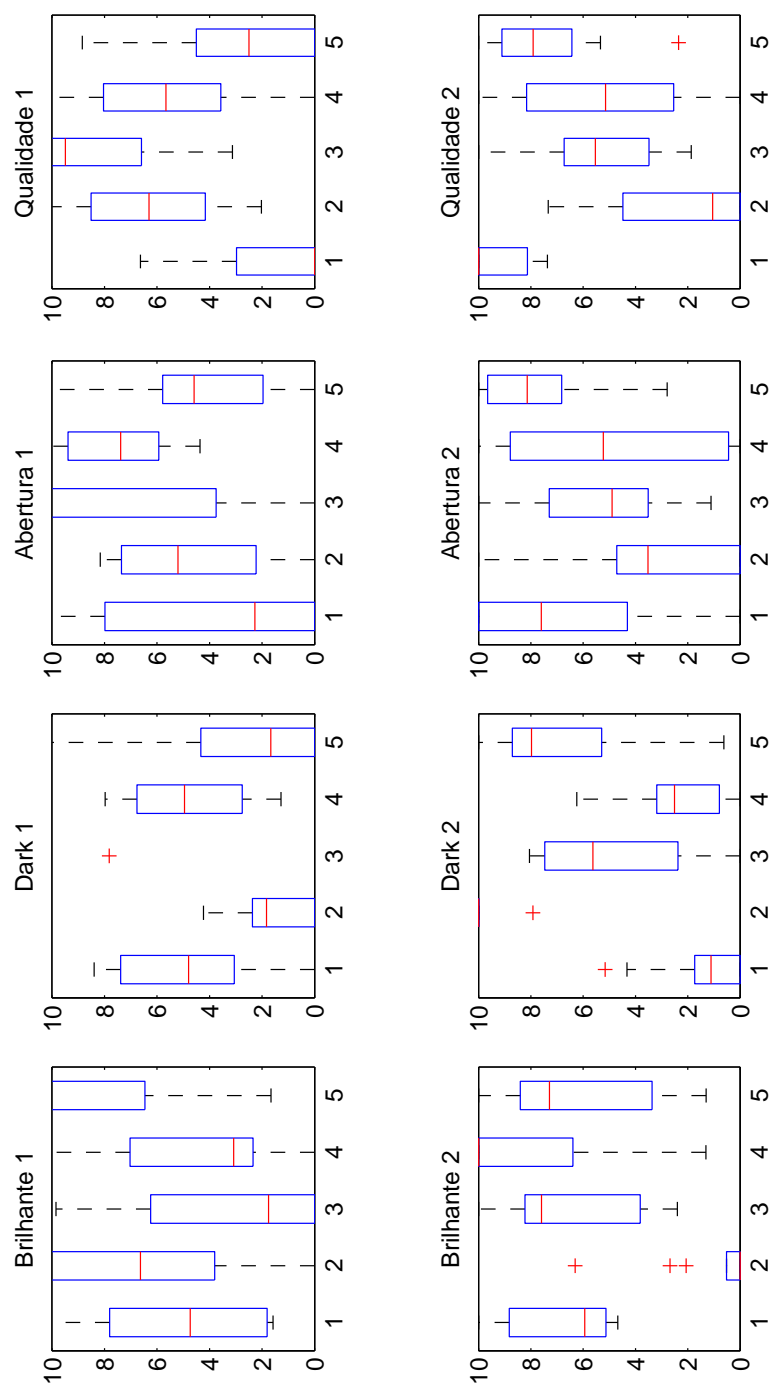


Figura 5.6 – Diagramas de caixa para as avaliações de amostras sonoras de ataque. Abcissa: amostras sonoras. Ordenada: grau relativo atribuído à característica. Fonte: Autor.

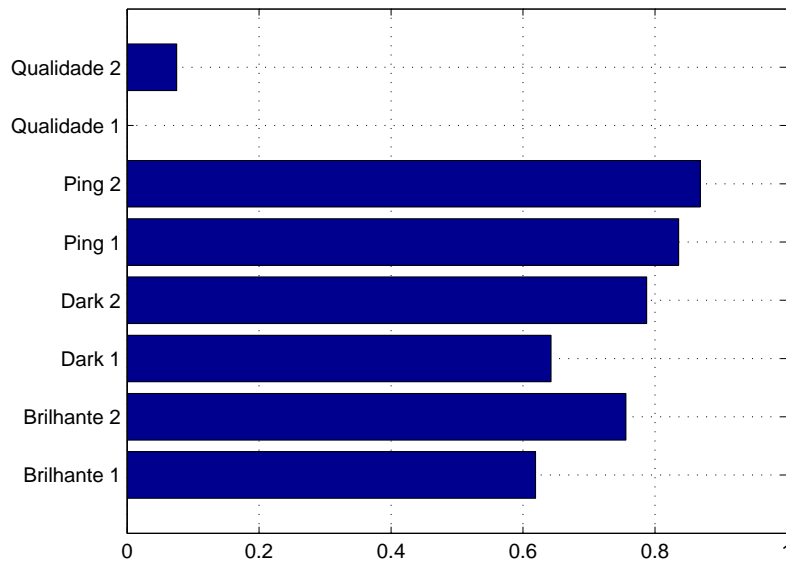


Figura 5.7 – Valores de ICC para as avaliações dos grupos de amostra de condução. Fonte: Autor.

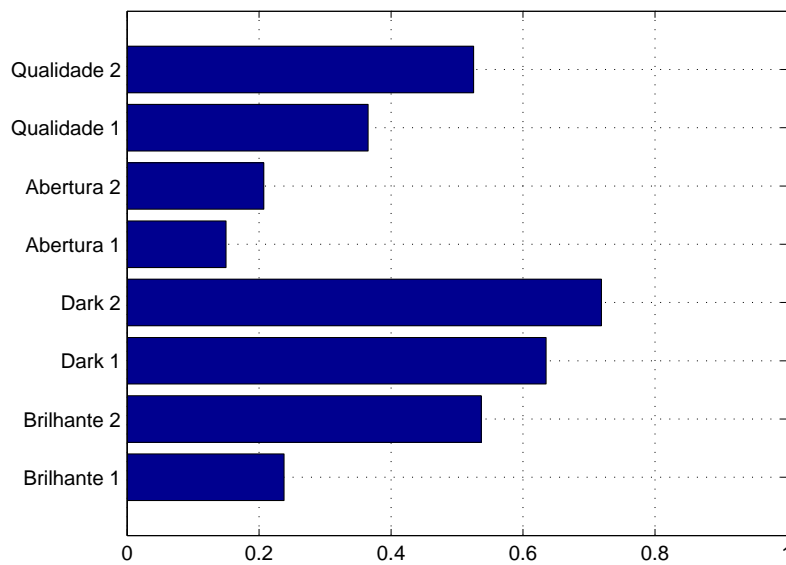


Figura 5.8 – Valores de ICC para as avaliações dos grupos de amostra de ataque. Fonte: Autor.

## 5.5 Conclusões preliminares

Como as etapas do ensaio com cada amostra sonora foram realizadas em sequência, é possível que alguns participantes tenham so-

frido uma cansaço mental, fazendo com que as amostras finais fossem avaliadas de uma forma menos detalhada. Inclusive, foi verificada justamente uma menor concordância das respostas entre os sujeitos para as amostras sonoras de ataque em relação às respostas para as amostras sonoras de condução. Contudo, ressalta-se que as características utilizadas não descrevem tão facilmente o timbre de ataque quanto ao timbre de condução.

Considerando a característica geral *Qualidade*, avaliada ao final de cada uma das etapas, pode-se observar uma concordância muito maior para as amostras de ataque do que para as de condução, que se apresentaram valores praticamente nulos. A *Qualidade* é um termo que depende tanto de gostos pessoais, quanto do estilo musical preferido pelo sujeito que realizou o teste. Assim, ao buscar o desenvolvimento de um modelo de *Qualidade* para um prato de condução, deve-se analisar outros parâmetros relacionados às preferências e à experiência pessoal dos músicos. Já para um prato de ataque, com os resultados dos testes apresentados neste trabalho, observa-se uma concordância maior, que pode ser utilizada, de fato, para estabelecer um possível modelo de *Qualidade*.



## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DESENVOLVIMENTO DE MODELOS

Neste capítulo, são apresentadas as correlações obtidas entre as análises objetivas e a análise subjetiva. A partir dos resultados de concordância entre os sujeitos, foram selecionados alguns grupos de amostras para determinadas características ( $ICC > 0,75$ ), dos quais foram calculados os coeficientes de correlação entre as medianas dos graus obtidos nas avaliações subjetivas e os valores provenientes das análises objetivas através dos modelos psicoacústicos.

Para as características e grupos que obtiveram altos coeficientes de correlação, propôs-se modelos através do método de regressão linear. Devido ao pequeno número de graus de liberdade existentes nos grupos (cinco amostras por grupo), modelos de regressão linear múltipla foram desenvolvidos, com no máximo três variáveis independentes. O capítulo divide-se em exposição dos resultados das características de timbre para condução e para ataque.

### 6.1 Condução

A partir do cálculo do ICC, foram selecionados os resultados da avaliação subjetiva para os quais  $ICC > 0,75$ . Para as características voltadas às amostras de condução, apenas a característica geral de *Qualidade* apresentou valores abaixo desse limite. Portanto foram desenvolvidos modelos para as características: *Brilhante*, *Dark* e *Ping*.

Para a característica *Brilhante*, selecionou-se o Grupo 2, cujos resultados de coeficiente de correlação de Pearson em relação às análises objetivas são mostrados na Figura 6.1. Para este grupo, as três maiores correlações foram: a *Loudness* com filtro passa-alta, *Sharpness* através do modelo de Aures e a Tonalidade de Aures. Como os dois primeiros parâmetros objetivos possuem uma relação entre si, isto é, ambos dependem da densidade energética do espectro em altas frequências, apenas a *Sharpness* de Aures foi selecionada para o modelo. A seguinte equação foi obtida por regressão linear envolvendo o modelo de *Sharpness* de Aures:

$$Br_2(S_A) = -35,683 + 27,441S_A, \quad (6.1)$$

com os valores de  $e_{RMS} = 1,52$ ,  $R^2 = 0,89$  e  $R_{adj}^2 = 0,853$ , onde  $Br_2(S_A)$  é a característica *Brilhante* em função da *Sharpness* de Aures.

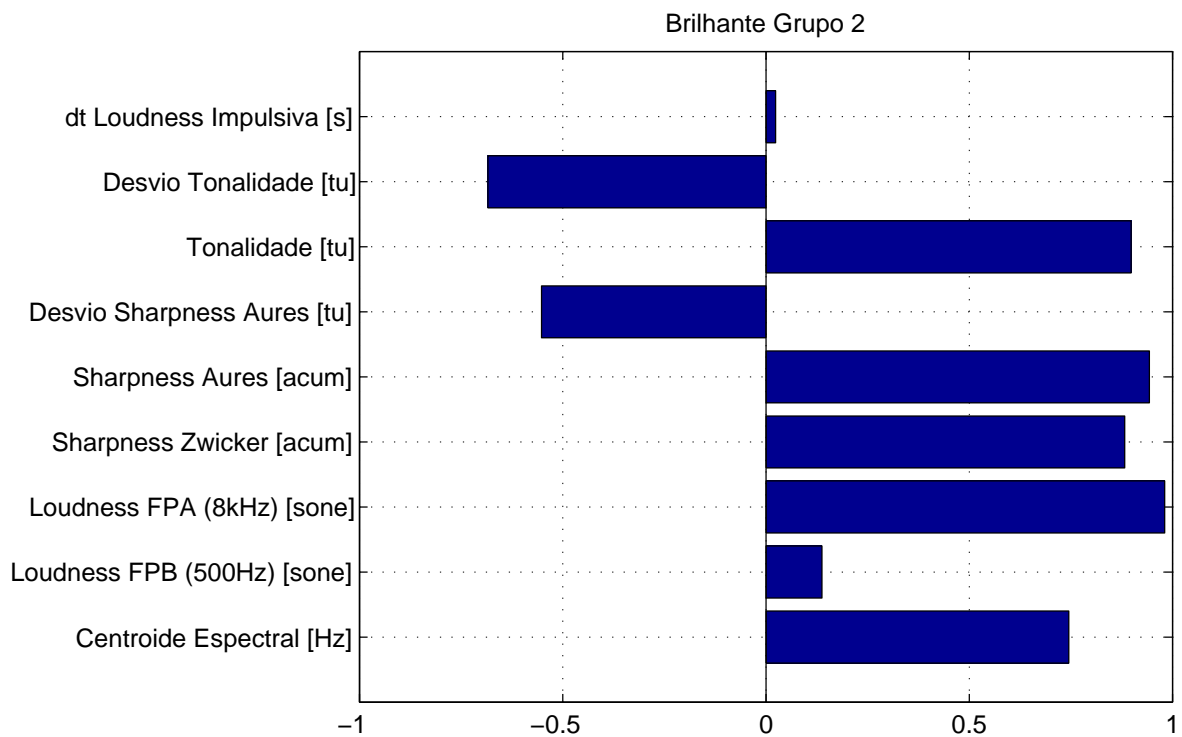


Figura 6.1 – Coeficientes de correlação de Pearson para as amostras do Grupo 2, característica *Brilhante*, em relação aos parâmetros objetivos. Fonte: Autor

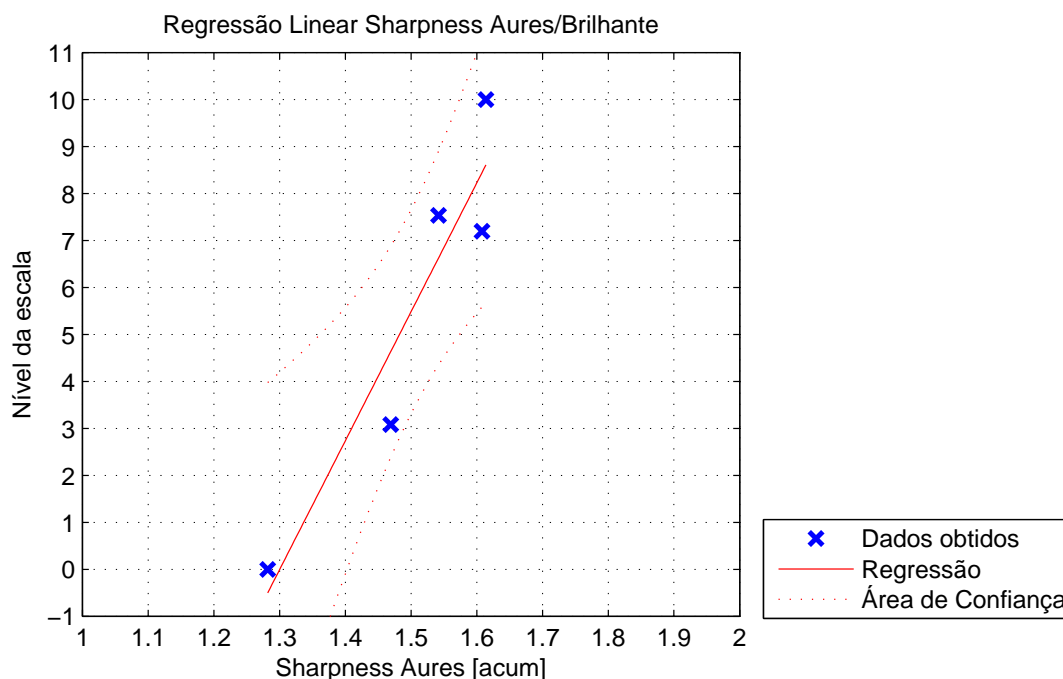


Figura 6.2 – Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica *Brilhante*, em relação aos valores obtidos com o modelo de *Sharpness* de Aures. Fonte: Autor

A Figura 6.2 mostra o gráfico do modelo de regressão, assim como os valores das medianas das amostras e a área de confiança da regressão.

Considerando apenas o modelo de Tonalidade de Aures, obteve-se uma regressão definida por:

$$Br_2(T) = -3,978 + 19,957T, \quad (6.2)$$

com os valores de  $e_{\text{RMS}} = 2,02$ ,  $R^2 = 0,807$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,743$ , onde  $Br_2(T)$  é a característica *Brilhante* em função da Tonalidade de Aures.

A Figura 6.3 mostra um gráfico do modelo de regressão, onde são indicadas as medianas das avaliações das amostras e a área de confiança da regressão.

Considerando os dois parâmetros objetivos da característica *Brilhante*, pode-se obter uma regressão linear múltipla através de:

$$Br_2(S_A, T) = -29,851 + 22,182S_A + 4,3633T, \quad (6.3)$$

com os valores de erro quadrático médio  $e_{\text{RMS}} = 1,82$ ,  $R^2 = 0,896$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,792$ , onde  $Br_2(S_A, T)$  é a característica *Brilhante* em função

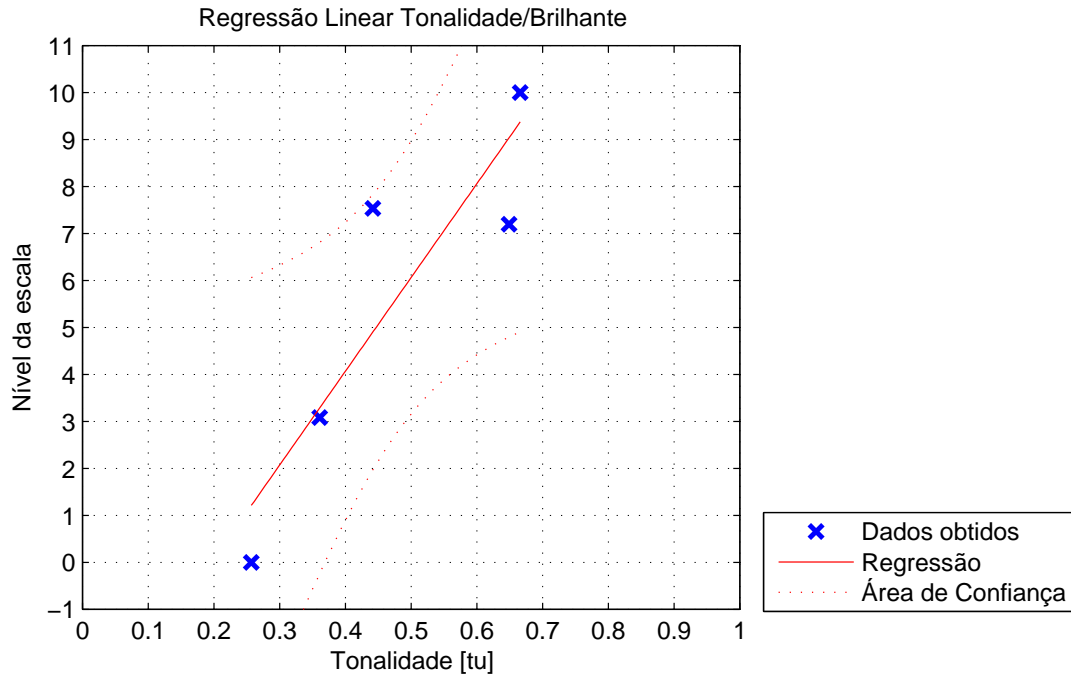


Figura 6.3 – Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica *Brilhante*, em relação aos valores obtidos com o modelo de Tonalidade de Aures. Fonte: Autor

dos modelos de *Sharpness* e Tonalidade de Aures.

Pode-se observar um pequeno aumento no coeficiente de determinação  $R^2$ , porém o erro médio  $e_{\text{RMS}}$  e o coeficiente de determinação ajustado  $R_{\text{adj}}^2$  apresentam valores maiores e menores, respectivamente, se comparados aos valores da primeira regressão realizada. Isso mostra que a utilização dos parâmetros de *Sharpness*, não considerando os parâmetros de Tonalidade, representa melhor a característica *Brilhante* para este grupo analisado.

Para a característica *Dark*, selecionou-se o Grupo 2, cujos resultados de coeficiente de correlação de Pearson em relação aos parâmetros objetivos são mostrados na Figura 6.4. Para este grupo, as três maiores correlações foram: a *Loudness* com filtro passa-baixa, *Sharpness* através do modelo de von Bismarck e a Tonalidade de Aures. Todas foram selecionadas para as regressões.

A regressão linear envolvendo a modelo de *Loudness* com filtro passa-baixa resultou em:

$$D_2(N_{\text{FPB}}) = -27,318 + 17,786N_{\text{FPB}}, \quad (6.4)$$

com os valores de  $e_{\text{RMS}} = 2,19$ ,  $R^2 = 0,778$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,704$ , onde



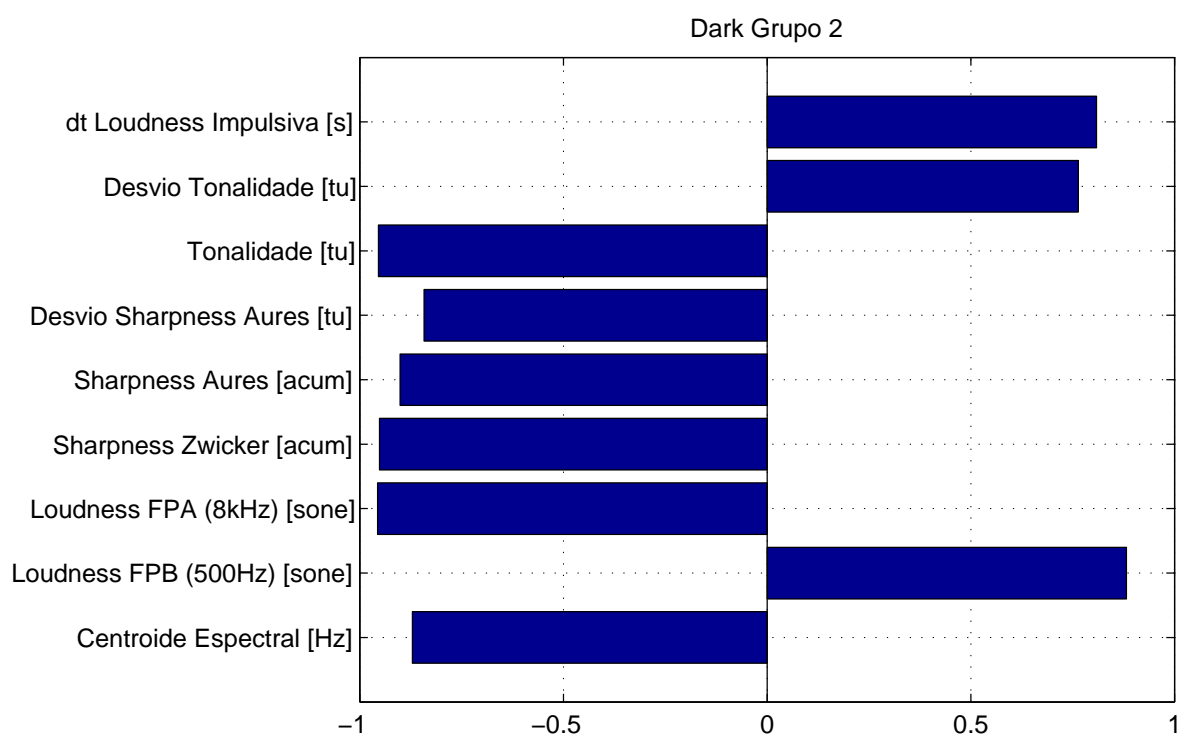


Figura 6.4 – Coeficientes de correlação de Pearson para as amostras do Grupo 2, característica *Dark*, em relação aos parâmetros objetivos. Fonte: Autor

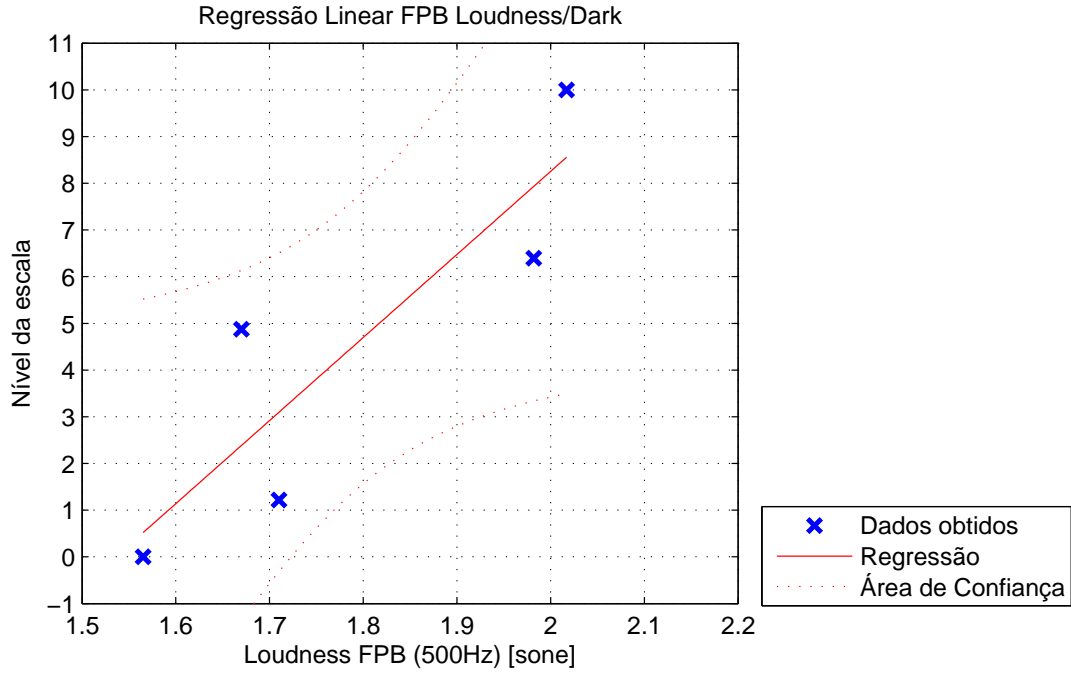


Figura 6.5 – Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica *Dark*, em relação aos valores no modelo de *Loudness* com filtro passa-baixa. Fonte: Autor

$D_2(N_{\text{FPB}})$  é a característica *Dark* em função da *Loudness* com filtro passa-baixa.

A Figura 6.5 mostra o gráfico do modelo de regressão, onde são indicadas as medianas das avaliações e a área de confiança da regressão.

Considerando apenas o modelo de *Sharpness* de von Bismarck, obteve-se uma regressão definida por:

$$D_2(S_B) = 50,173 - 24,943S_B, \quad (6.5)$$

com os valores de  $e_{\text{RMS}} = 1,43$ ;  $R^2 = 0,905$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,873$ , onde  $D_2(S_B)$  é a característica *Dark* em função da *Sharpness* de von Bismarck.

A Figura 6.6 mostra um gráfico do modelo de regressão, no qual são apresentadas também as medianas das avaliações e a área de confiança da regressão.

Considerando apenas o modelo de Tonalidade de Aures, obteve-se uma regressão definida por:

$$D_2(T) = 12,316 + 19,537T, \quad (6.6)$$

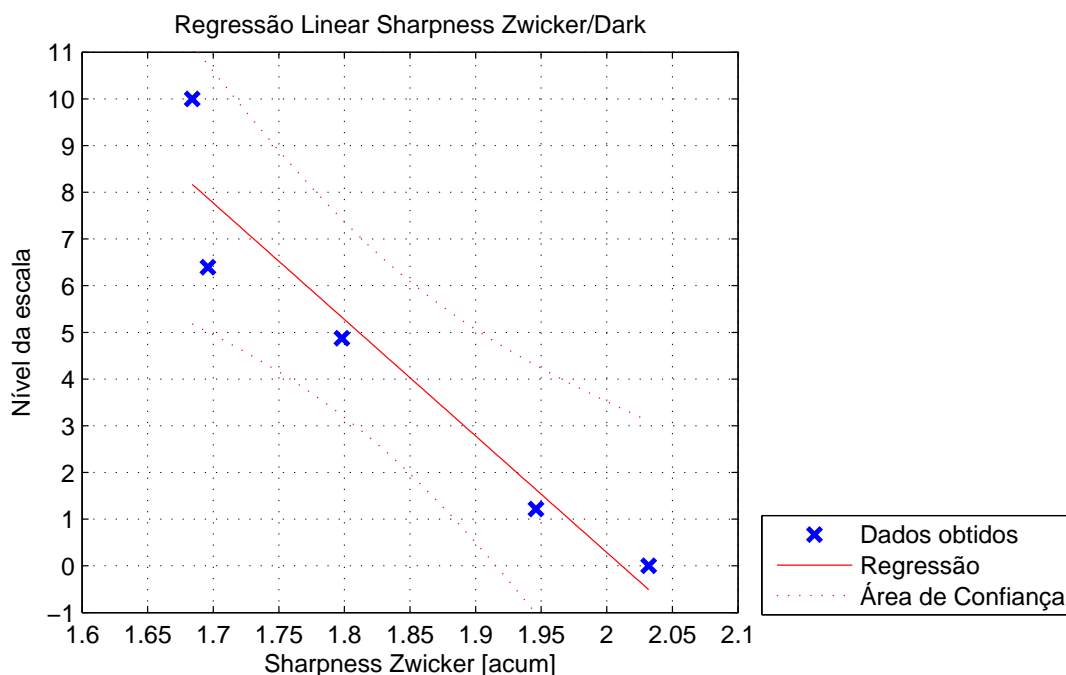


Figura 6.6 – Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica *Dark*, em relação aos valores obtidos com o modelo de *Sharpness* de von Bismarck. Fonte: Autor

com os valores de  $e_{\text{RMS}} = 1,39$ ;  $R^2 = 0,91$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,881$ , onde  $D_2(T)$  é a característica *Dark* em função da Tonalidade de Aures.

A Figura 6.7 mostra um gráfico do modelo de regressão, no qual também são indicadas as medianas das avaliações e a área de confiança da regressão.

Tomando-se os três parâmetros objetivos da característica *Dark*, pode-se obter uma regressão linear múltipla através de:

$$D_2(N_{\text{FPB}}, S_B, T) = -0,30125 + 6,9884N_{\text{FPB}} - 1,3251S_B - 13,183T \quad (6.7)$$

com os valores de  $e_{\text{RMS}} = 1,44$ ;  $R^2 = 0,968$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,892$ , onde  $D_2(N_{\text{FPB}}, S_B, T)$  é a característica *Dark* em função da *Loudness*, *Sharpness* e Tonalidade.

Observa-se um pequeno aumento nos coeficientes  $R^2$  e  $R_{\text{adj}}^2$ , como também um decaimento do erro médio  $e_{\text{RMS}}$  em relação às regressões obtidas anteriormente com apenas uma variável independente.

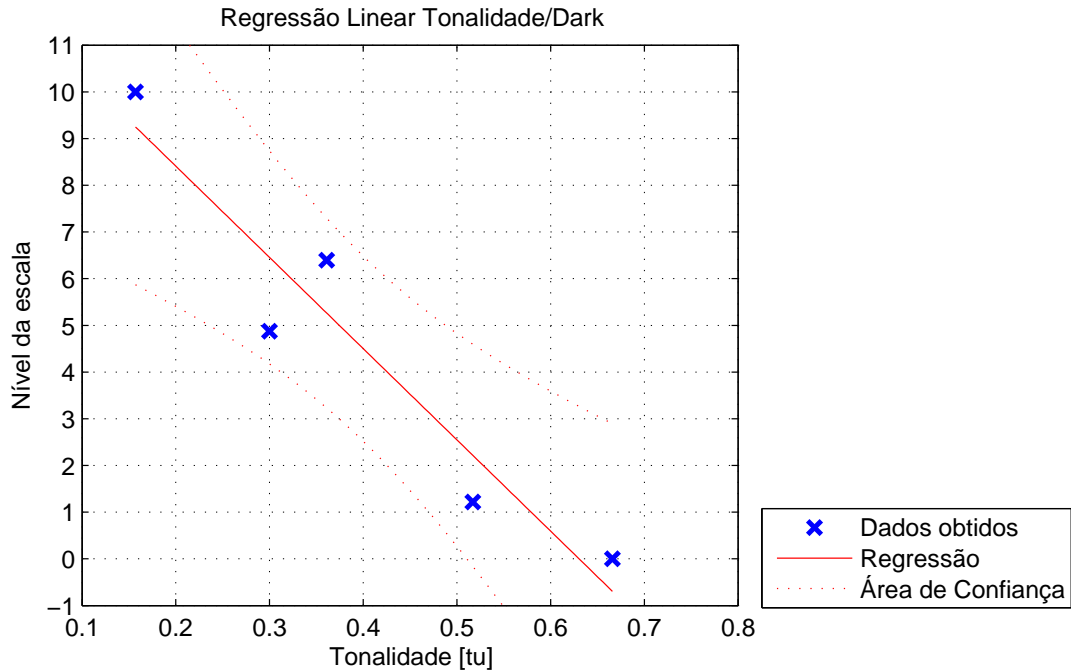


Figura 6.7 – Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica *Dark*, em relação aos valores obtidos com o modelo de Tonalidade de Aures. Fonte: Autor

Para a característica *Ping*, selecionou-se o Grupo 1, cujos coeficientes de correlação de Pearson em relação às análises objetivas são apresentados na Figura 6.8. Para este grupo, as três maiores correlações foram: a Tonalidade de Aures, o desvio da Tonalidade e o intervalo de *Loudness* impulsiva. Todas as três foram selecionadas para as regressões.

A regressão linear envolvendo a análise de Tonalidade resultou em:

$$P_1(T) = -2,1491 + 20,013T, \quad (6.8)$$

com os valores de  $e_{\text{RMS}} = 1,04$ ;  $R^2 = 0,945$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,927$ , onde  $P_1(T)$  é a característica *Ping* em função da Tonalidade de Aures.

A Figura 6.9 mostra um gráfico do modelo de regressão, na qual são apresentadas também as medianas das amostras e a área de confiança da regressão.

Considerando apenas o desvio padrão temporal da Tonalidade  $\sigma_T$ , obteve-se a regressão linear definida pela equação:

$$P_1(\sigma_T) = 15,479 - 37,975\sigma_T, \quad (6.9)$$

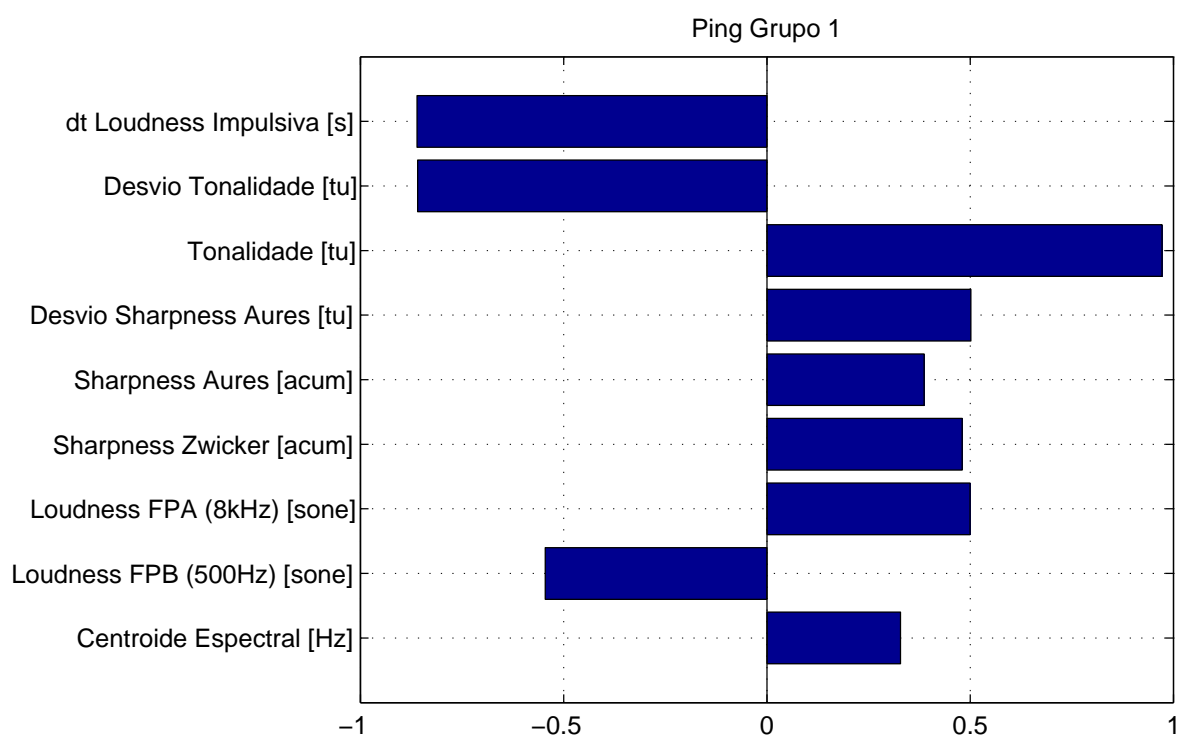


Figura 6.8 – Coeficientes de correlação de Pearson para as amostras do Grupo 1, característica *Ping*, em relação aos parâmetros objetivos. Fonte: Autor

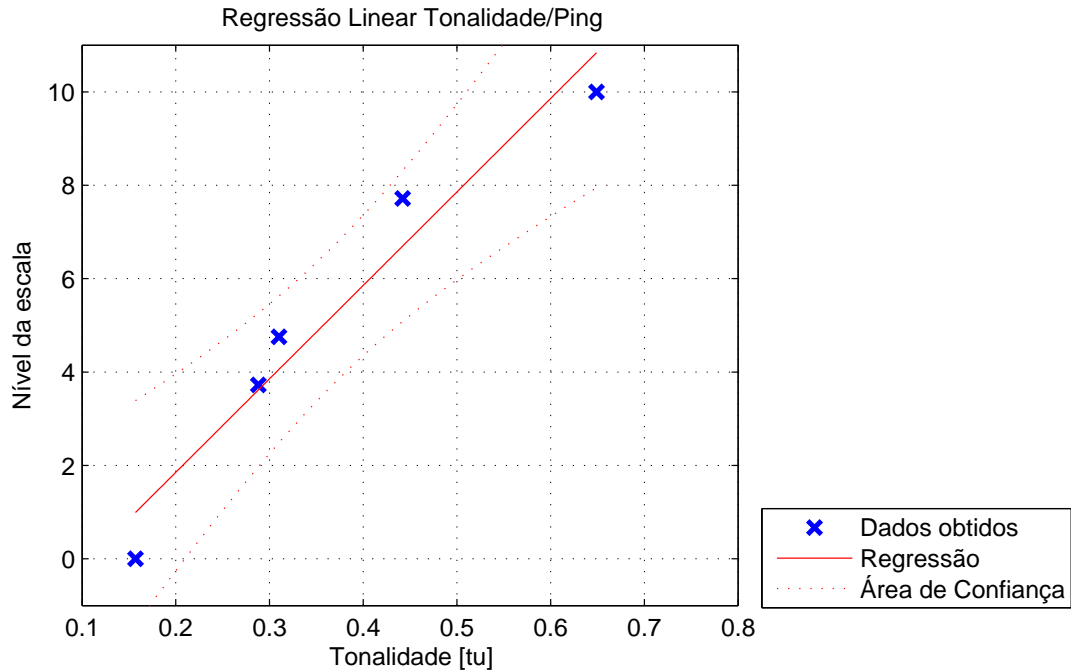


Figura 6.9 – Modelo de regressão linear para o Grupo 1 da característica *Ping*, em relação aos valores obtidos com o modelo de Tonalidade de Aures. Fonte: Autor

com os valores de  $e_{\text{RMS}} = 2,27$ ;  $R^2 = 0,738$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,65$ , onde  $P_1(\sigma_T)$  é a característica *Ping* em função do desvio padrão temporal da Tonalidade de Aures.

A Figura 6.10 mostra um gráfico do modelo de regressão, onde são também indicadas as medianas das avaliações e a área de confiança da regressão.

Considerando apenas o intervalo temporal relacionado à *Loudness* impulsiva  $\Delta t_{\Delta N=10}$ , obteve-se a regressão definida pela equação:

$$P_1(\Delta t_{\Delta N=10}) = 9,4378 - 25,851\Delta t_{\Delta N=10}, \quad (6.10)$$

com os valores de  $e_{\text{RMS}} = 2,25$ ;  $R^2 = 0,741$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,655$ , onde  $P_1(\Delta t_{\Delta N=10})$  é a característica *Ping* em função do intervalo temporal relacionado à *Loudness* impulsiva.

A Figura 6.11 mostra um gráfico do modelo de regressão, no qual são apontadas as medianas das avaliações, bem como a área de confiança da regressão.

Considerando-se as três análises objetivas da característica *Ping*,

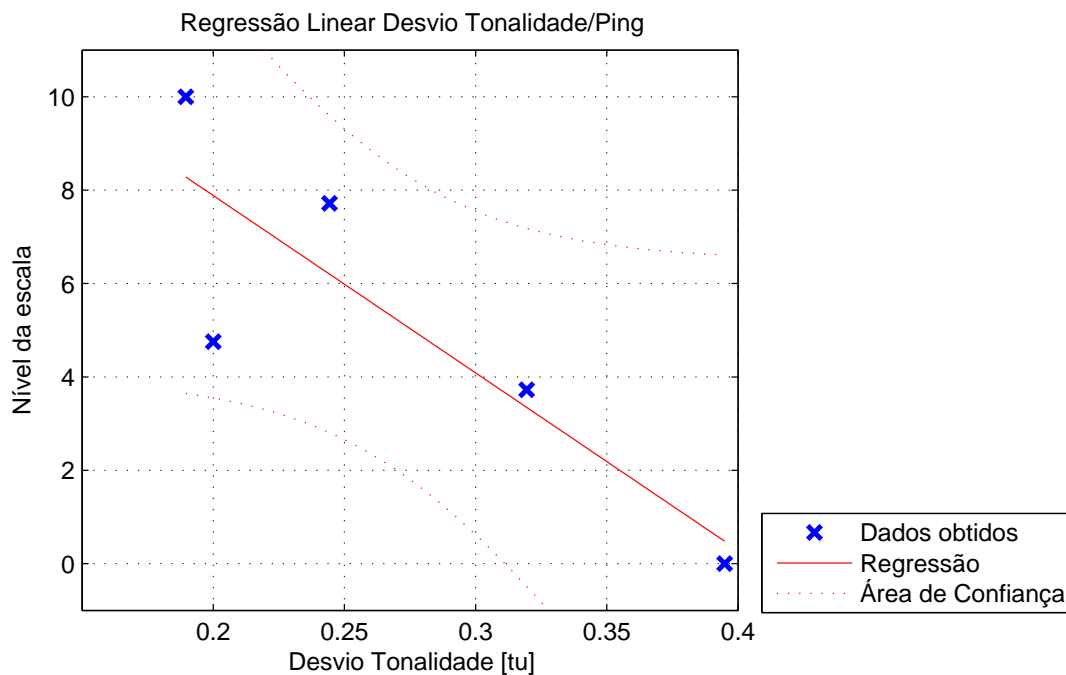


Figura 6.10 – Modelo de regressão linear para o Grupo 1 da característica *Ping*, em relação aos valores obtidos com o desvio padrão temporal da Tonalidade de Aures. Fonte: Autor

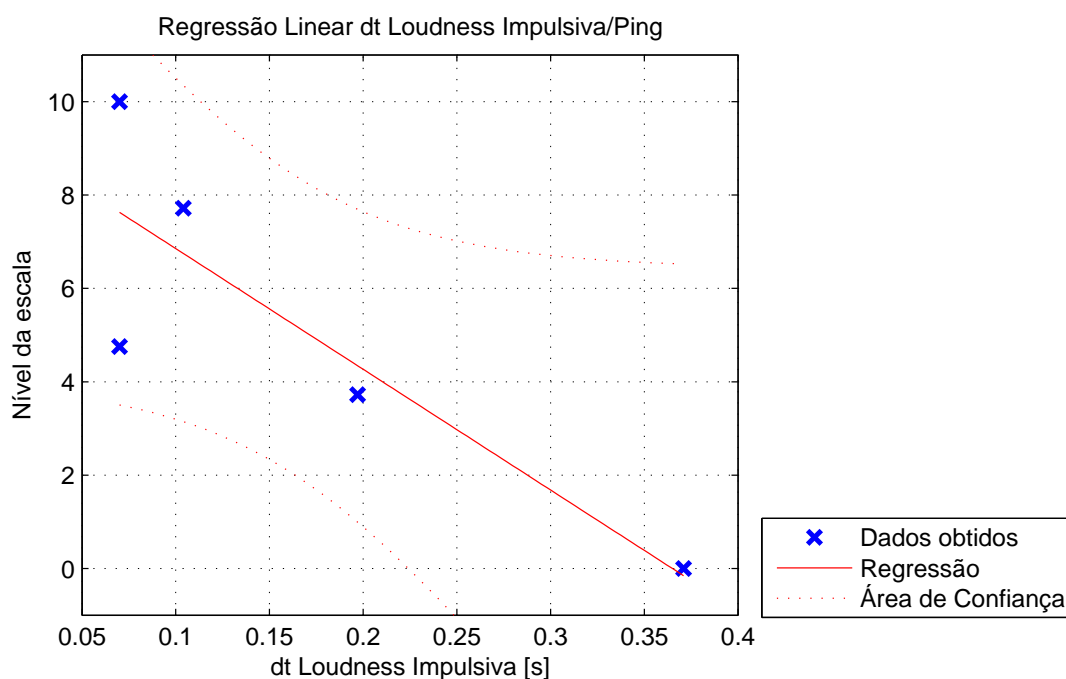


Figura 6.11 – Modelo de regressão linear para o Grupo 1 da característica *Ping*, em relação aos valores obtidos com o intervalo temporal relacionado à *Loudness* impulsiva. Fonte: Autor

obtém-se o modelo de regressão linear múltipla através de:

$$P_1(T, \sigma_T, \Delta t_{\Delta N=10}) = -2,5366 + 16,42T + 18,378\sigma_T - 19,96\Delta t_{\Delta N=10}, \quad (6.11)$$

onde  $e_{\text{RMS}} = 0,752$ ;  $R^2 = 0,99$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,961$ , onde  $P_1(T, \sigma_T, \Delta t_{\Delta N=10})$  é a característica *Ping* em função da Tonalidade de Aures, seu desvio padrão temporal e o intervalo de *Loudness* impulsiva. Pode-se observar um ligeiro aumento nos coeficientes  $R^2$  e  $R_{\text{adj}}^2$ , assim como um decaimento do erro médio  $e_{\text{RMS}}$ , em relação às regressões realizadas com apenas uma variável independente.

Os modelos desenvolvidos nesta seção, envolvendo amostras de condução, são apenas um exemplo inicial de possíveis resultados empregando a metodologia utilizada neste trabalho. Nos grupos selecionados que apresentaram maior concordância no julgamento da característica referente, foi possível encontrar relações lineares com modelos psicoacústicos. O julgamento da característica *Brilhante* mostrou uma boa correlação com a sensação de agudeza, demonstrada através do modelo de *Sharpness*, que considera o efeito das altas frequências. Não só com o modelo para sensação de agudeza, mas também obteve-se uma boa correlação com o modelo de sensação de tonalidade. Ou seja, essa característica no grupo escolhido também pode estar relacionada com sons menos ruidosos e mais tonais.

Para o grupo escolhido da característica *Dark*, as correlações com o modelo de *Loudness* utilizando um filtro-passa baixa demonstram a importância da sensação de volume sonoro nas baixas frequências. As correlações com os modelos de Tonalidade e *Sharpness* apresentaram resultados inversamente proporcionais aos valores dos julgamentos, mostrando que a característica relaciona-se com sons mais ruidosos e graves. Por último, ao analisar as correlações com os modelos de Tonalidade e *Loudness* impulsiva, o julgamento da característica *Ping* para o grupo escolhido demonstrou uma relação com sensações de sons mais tonais e impulsivos.

## 6.2 Ataque

Para as amostras de ataque, a variância das respostas entre os participantes foi consideravelmente maior para todas as características, em relação aos dados obtidos com as amostras de condução. Os grupos de amostras analisados para cada característica apresentaram menores coeficientes ICC, em comparação com os obtidos nas amostras de



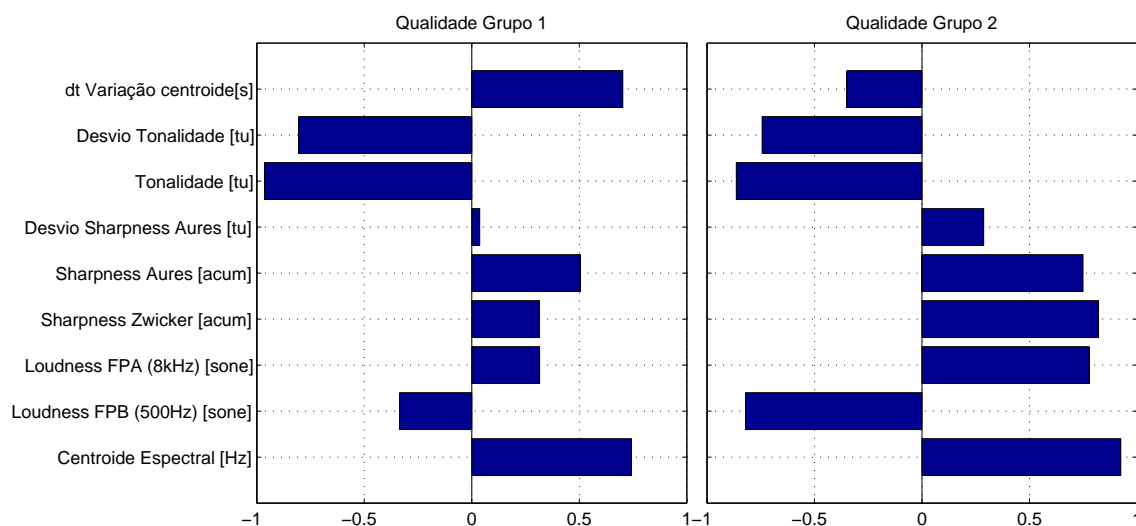


Figura 6.12 – Coeficientes de correlação de Pearson para as amostras dos Grupos 1 e 2, característica *Qualidade*, em relação às análises objetivas. Fonte: Autor

condução (Figuras 5.7 e 5.8). Contudo, a maior diferença foi na característica geral de *Qualidade*, que mostrou uma confiabilidade maior ( $ICC \cong 0,50$ ) para as amostras de ataque, em comparação com as de condução ( $ICC \cong 0,05$ ). Desta forma, não serão apresentados modelos de regressão para as características *Brilhante*, *Dark* e *Abertura*, mas sim para a *Qualidade*.

Analisando a correlação dos dois grupos de amostras de ataque, referentes à característica *Qualidade*, a Figura 6.12 mostra que para ambos os grupos existe uma forte correlação com a Tonalidade de Aures.

A partir do Grupo 2, obtém-se a regressão linear envolvendo a análise de Tonalidade segundo:

$$Q_2(T) = 13,311 - 27,454T \quad (6.12)$$

com os valores de  $e_{\text{RMS}} = 1,11$ ;  $R^2 = 0,93$  e  $R_{\text{adj}}^2 = 0,907$ , onde  $Q_2(T)$  é a característica *Qualidade* em função da Tonalidade de Aures.

A Figura 6.11 mostra um gráfico do modelo de regressão com as medianas das avaliações e a área de confiança da regressão.

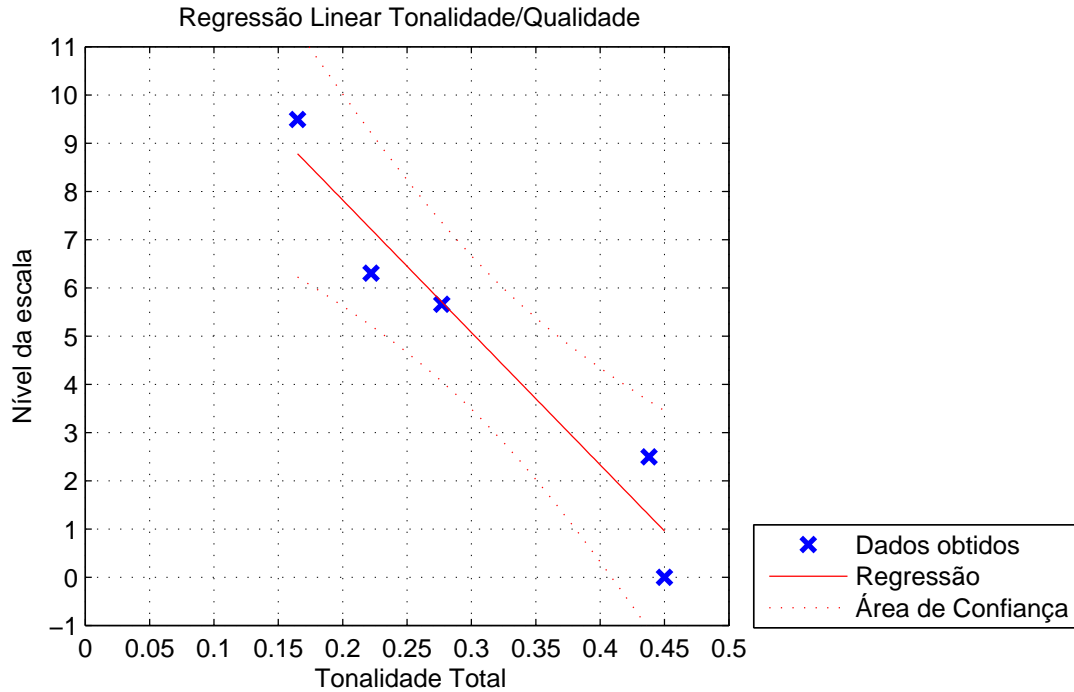


Figura 6.13 – Modelo de regressão linear para o Grupo 2 da característica *Qualidade*, em relação aos valores obtidos para a Tonalidade de Aures. Fonte: Autor

Mesmo apresentando uma concordância baixa entre os jurados no julgamento do grupo de pratos selecionado, deve-se levar em conta que a sensação de alta tonalidade em um som gerado por ataque pode indicar uma má qualidade no timbre. Diferente das amostras condução, a qualidade para o timbre de ataque pode ter uma considerável concordância entre julgamentos, independente dos estilos musicais dos músicos participantes.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Conclusões

Este trabalho baseou-se em três pontos principais, conforme a revisão bibliográfica apresentada: timbre, psicoacústica e pratos de percussão. Buscou-se, nos primeiros capítulos, demonstrar que o timbre é um conceito ainda pouco definido e que apresenta uma multidimensionalidade, sendo que as dimensões variam de acordo com o tipo de som a ser avaliado.

O método mais utilizado para a compreensão das dimensões desse conceito, baseado na identificação de dissimilaridades entre sons, é o escalonamento multidimensional, conhecido como MDS. Pelas limitações de prazo e pela ausência de população numerosa apta para realização desse tipo de método, foi possível conduzir apenas um exemplo (como mostrado no Apêndice D). O caráter estatístico das análises realizadas requer maior número de participantes a fim de reduzir os desvios das respostas e aumentar a confiabilidade dos resultados. Ressalta-se, igualmente, a dificuldade em se determinar qual característica a ser analisada e como diferenciar as amostras entre si. Em especial, observa-se o fato de que avaliações subjetivas estão sujeitas à interpretação pessoal de cada participante. Assim, acredita-se que a grande variância presente nas respostas entre os sujeitos pode ser proveniente de cada um deles estar observando diferenças, porém imaginando-as a partir de características distintas.

A utilização de modelos psicoacústicos para a análise de timbre ainda é pouco utilizada. Destaca-se que os modelos psicoacústicos desenvolvidos ainda não são aptos para aplicações generalizadas e consistentes, além de não ter sido validados para qualquer tipo de som. A modelagem das sensações definidas foi direcionada às análises espectrais e espectro-temporais, com exceção do decaimento temporal de *Loudness*. O regime transiente do som gerado pelo impacto de pratos, composto de variações espectro-temporais evidentes e de comportamento pouco conhecido, tornou necessária a utilização de um número grande de observações objetivas e modelos psicoacústicos. A ideia foi utilizar o maior número de formas de análise objetiva que representassem características específicas do comportamento sonoro, e que possivelmente possuem uma relação com a percepção humana responsável pela criação das sensações atribuídas ao timbre do instrumento.

O principal modelo psicoacústico utilizado foi o de *Loudness* de Zwicker (DIN45631 e ISO532), onde todas as amostras foram normalizadas em relação à sensação de volume sonoro total. A *Loudness* específica por bandas críticas (*Loudness* com filtros, *Sharpness* e centroide espectral), bem como sua variação temporal, foi um dos focos para representação das sensações que consistem o timbre. Buscando uma relação das bandas críticas entre si, utilizou-se um modelo de Tonalidade, a fim de se observar o quão evidentes algumas delas aparentam na percepção auditiva. Através da realização desses tipos de análise objetiva, obteve-se uma boa correlação com alguns resultados das análises feitas durante a etapa subjetiva.

A metodologia proposta para a análise subjetiva, utilizando grupos aleatórios, buscou atingir um número maior de características a serem analisadas em apenas um ensaio. Foram utilizadas cinco amostras por grupo, com o intuito de evitar cansaço dos participantes durante a realização. Observa-se que, para o desenvolvimento de modelos pelo método de regressão linear, este número pode ser considerado pequeno, mas neste trabalho buscou-se separar dois grupos avaliados, a fim de observar se a concordância entre eles seria equivalente ou não. A ordem e separação das amostras por grupo foi selecionada aleatoriamente. Isto foi feito pois não foi escolhido nenhum valor referência de análise objetiva para cada característica.

Verificou-se que nem todos os participantes estavam cientes do significado dos atributos utilizados. Assim, recomenda-se a realização de uma avaliação da pertinência de cada termo empregado para definir as características do timbre deste tipo de instrumento. A lista de atributos assim especificada pode ser mais compatível com o vocabulário dos participantes. Justifica-se a ausência desta análise neste trabalho pelo tempo que seria demandado, bem como pelo número de participantes alcançado pela pesquisa.

Uma menor concordância entre respostas dos sujeitos foi obtida para as amostras de ataque em relação às respostas de condução. Contudo, ressalta-se que as características avaliadas não descrevem tão facilmente o timbre de ataque quanto ao timbre de condução. Além disso, verificou-se que os sinais sonoros provenientes das amostras de ataque são mais complexos em relação às variações espectrais e espectro-temporais, se comparados aos gerados pelas amostras de condução.

A partir dos resultados de análises objetivas e subjetivas das amostras de condução, as três primeiras características foram selecionadas pois apresentaram boa concordância no julgamento ( $ICC > 0,75$ ). Para a característica *Brilhante*, foram obtidas regressões lineares con-

siderando como variáveis independentes a *Sharpness* e a Tonalidade de Aures. O modelo utilizando apenas a *Sharpness* de Aures apresentou um coeficiente de regressão ajustado maior que o modelo múltiplo envolvendo ambas as variáveis. Conclui-se, portanto, que para o grupo selecionado, a característica *Brilhante* pode estar relacionada com a densidade espectral em altas frequências, que, por sua vez, está diretamente relacionada com a sensação de agudeza. A sensação de tonalidade também mostra uma relação considerável com essa característica, porém apresenta menor coeficiente de determinação.

Para a característica *Dark*, foram obtidas regressões lineares considerando como variáveis independentes: *Loudness* (com filtro passa-baixa), *Sharpness* de von Bismarck e Tonalidade de Aures. O modelo de regressão múltipla envolvendo todas as variáveis apresentou os melhores coeficientes de determinação, se comparado com os modelos de cada variável separada. Para o grupo selecionado, conclui-se que a característica *Dark* pode estar relacionada com a sensação de volume dos graves (bandas críticas em baixas frequências), assim como baixa tonalidade e agudeza (bandas críticas em altas frequências).

Para a característica *Ping*, foram obtidas regressões lineares considerando como variáveis independentes a Tonalidade de Aures, seu desvio temporal e o intervalo para *Loudness* impulsiva. O modelo de regressão múltipla envolvendo todas as variáveis apresentou uma pequena melhora nos coeficientes de determinação, em relação aos modelos de cada variável separada. Contudo, a comparação entre os modelos individuais mostra que a tonalidade possui uma correlação muito maior. Desta forma, conclui-se que para o grupo selecionado, a característica *Ping* pode estar relacionada com a sensação de tonalidade com pouca variação associada a uma sensação alta de impacto gerada por um rápido decaimento de sensação de volume sonoro.

Em relação às amostras de ataque, não foram apresentados modelos de regressão linear para as três primeiras características avaliadas pelos sujeitos, visto que não foram verificadas correlações consideráveis entre as variáveis. Por outro lado, já que na característica *Qualidade* houve maior concordância entre as respostas (ao ser comparada com as amostras de condução), optou-se por analisar a correlação desta característica com os resultados das análises objetivas. Na correlação dos dois grupos para a característica *Qualidade*, para amostras de ataque, em relação às análises objetivas realizadas, observa-se que a Tonalidade de Aures apresenta um alto valor do coeficiente em ambos os grupos. Considerando-se o Grupo 2, que apresentou melhores resultados de ICC, foi obtido um modelo de regressão linear utilizando apenas a To-

nalidade de Aures como variável independente. Com os resultados do modelo, pode-se concluir que há a possibilidade da sensação de tonalidade elevada estar relacionada com o oposto da qualidade. Em outras palavras, um prato de ataque com características muito tonais pode ser considerado um prato de má qualidade, conforme a opinião dos participantes deste trabalho. Acredita-se que o estilo de som buscado em um prato de ataque seja equivalente a um timbre que apresente uma forma mais padronizada, aceitável por músicos de diferentes estilos musicais.

Por fim, tendo-se em vista a escassez na literatura de estudos que relacionem o timbre de pratos de percussão com conceitos de psicoacústica, espera-se que este trabalho seja fonte de conhecimento e possa contribuir no desenvolvimento desta linha de pesquisa. Buscou-se atribuir características de cunho objetivo a este conceito pouco explorado, que é geralmente empregado de forma subjetiva com base na experiência e percepção humanas. Com isso, considera-se o principal mérito desta pesquisa sob a perspectiva da contribuição científica ao estudo do conceito de timbre em pratos de percussão.

## 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Nesta seção serão apresentadas sugestões para próximos trabalhos, identificadas com base nas dificuldades encontrados e na experiência adquirida no decorrer deste trabalho:

- realizar avaliações subjetivas buscando relações de dissimilaridades entre amostras de prato, com o objetivo de concluir uma análise de MDS com um número grande de participantes;
- realizar o levantamento dos termos utilizados entre músicos referentes a pratos de percussão e realizar uma avaliação de pertinência envolvendo um número grande de participantes. Sugere-se também a realização através da *internet*;
- comparar as análises objetivas de *Loudness* obtidas pelo modelo de Zwicker com análises utilizando o modelo de Moore, que também considera sinais transientes;
- analisar apenas uma característica isolada, utilizando um grupo com número grande de amostras, escolhidas através do resultado de uma análise objetiva pré-determinada. Por exemplo: característica *Brilhante* e o modelo de *Sharpness*, selecionando sons de pratos com valores muito distintos deste determinado modelo;

- utilizar métodos para modelar a percepção de dissonância entre tons evidentes no espectro sonoro, e encontrar relações entre características como a *Qualidade*;
- testar os efeitos de diferentes tipos de baqueta, para o mesmo modelo de prato de condução, analisando os efeitos de variação temporal e espectral. Para isso, é preciso buscar uma forma de controle do impacto durante as gravações das amostras, sendo ele através de um sistema automático ou através de treino e calibração com um músico participante;
- ao desenvolver um sistema para medir e controlar a força de impacto, analisar as variações não lineares no espectro de resposta e encontrar uma relação entre a variação da densidade do espectro normalizada, com o módulo da força aplicada. Assim, pode-se desenvolver uma forma de medir características dinâmicas dos pratos, que são bastante utilizadas por músicos bateristas;
- analisar a variação de certas características de acordo com o ponto de captação sonora. Para um mesmo prato (condução ou ataque), gravar o som com um número grande de microfones, posicionados em diferentes ângulos e distâncias em relação ao centro.





## REFERÊNCIAS

- [1] BEAUCHAMP, J. W. **Analysis, synthesis, and perception of musical sounds**. [S.l.]: Springer, 2007.
- [2] FASTL, H.; ZWICKER, E. **Psychoacoustics: facts and models**. [S.l.]: Springer, 2007.
- [3] HENRIQUE, L. L. **Acústica musical**. [S.l.: s.n.], 2002.
- [4] SCHNEIDER, A. Inharmonic sounds: Implications as to pitch, timbre and consonance. **Journal of New Music Research**, Taylor & Francis, v. 29, n. 4, p. 275–301, 2000.
- [5] PINKSTERBOER, H. **The cymbal book**. [S.l.]: Hal Leonard Corporation, 1992.
- [6] SMALLEY, D. Defining timbre, refining timbre. **Contemporary Music Review**, Taylor & Francis, v. 10, n. 2, p. 35–48, 1994.
- [7] HIRST, D. et al. Developing analysis criteria based on Denis Smalley's timbre theories. In: **Proceedings of the Australasian Computer Music Conference 2002**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 43–52.
- [8] ASSOCIATION, A. S. et al. Acoustical terminology SI, 1–1960. **American Standards Association, New York**, 1960.
- [9] HORNBOSTEL, E. M. von; SACHS, C. Classification of musical instruments: Translated from the original German by Anthony Baines and Klaus P. Wachsmann. **The Galpin Society Journal**, JSTOR, p. 3–29, 1961.
- [10] LAKATOS, S. A common perceptual space for harmonic and percussive timbres. **Perception & Psychophysics**, Springer, v. 62, n. 7, p. 1426–1439, 2000.
- [11] MIRKA, D. To cut the gordian knot: the timbre system of Krzysztof Penderecki. **Journal of Music Theory**, JSTOR, p. 435–456, 2001.
- [12] SPENDER, N. Psychology of music (i-iii). **The New Grove's Dictionary of Music and Musicians**, v. 15, p. 388–427, 1980.

- [13] SCHOUTEN, J. F. The perception of timbre. In: **Reports of the 6th International Congress on Acoustics**. [S.l.: s.n.], 1968. v. 76, p. 10.
- [14] ZHANG, X.; RAS, Z. W. Analysis of sound features for music timbre recognition. In: IEEE. **Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2007. MUE'07. International Conference on**. [S.l.], 2007. p. 3–8.
- [15] LOGAN, B. et al. Mel frequency cepstral coefficients for music modeling. In: **ISMIR**. [S.l.: s.n.], 2000.
- [16] STEVENS, S. S.; VOLKMANN, J.; NEWMAN, E. B. A scale for the measurement of the psychological magnitude pitch. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 8, n. 3, p. 185–190, 1937.
- [17] PINCH, T. J.; TROCCO, F.; PINCH, T. **Analog days: The invention and impact of the Moog synthesizer**. [S.l.]: Harvard University Press, 2009.
- [18] HAJDA, J. M. The effect of time-variant acoustical properties on orchestral instrument timbres. **PhD Thesis, University of California**, 1999.
- [19] HAJDA, J. M. The effect of amplitude and centroid trajectories on the timbre of percussive and nonpercussive orchestral instruments. In: **Proc. 16th International Congress on Acoustics and 135th Meeting of the Acoustical Society of America**. [S.l.: s.n.], 1998. v. 3, p. 1887–1888.
- [20] GUVEN, E.; OZBAYOGLU, A. M. Note and timbre classification by local features of spectrogram. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 12, p. 182–187, 2012.
- [21] BRENT, W. Cepstral analysis tools for percussive timbre identification. In: **Proceedings of the 3rd International Pure Data Convention, Sao Paulo, Brazil**. [S.l.: s.n.], 2009.
- [22] BRENT, W. **Perceptually based pitch scales in cepstral techniques for percussive timbre identification**. [S.l.]: Ann Arbor, MI: MPublishing, University of Michigan Library, 2009.
- [23] WICKELMAIER, F. An introduction to MDS. **Sound Quality Research Unit, Aalborg University, Denmark**, 2003.

- [24] SCHIFFMAN, S. S. et al. **Introduction to multidimensional scaling: Theory, methods, and applications**. [S.l.]: Academic press New York, 1981.
- [25] CARROLL, J. D.; ARABIE, P. Multidimensional scaling. **Measurement, judgment, and decision making**, Academic Pr, p. 179–250, 1998.
- [26] MARTINEZ, W. L.; MARTINEZ, A.; SOLKA, J. **Exploratory data analysis with MATLAB**. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- [27] GREY, J. M. Multidimensional perceptual scaling of musical timbres. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 61, n. 5, p. 1270–1277, 1977.
- [28] IVERSON, P.; KRUMHANSL, C. L. Isolating the dynamic attributes of musical timbre). **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 94, n. 5, p. 2595–2603, 1993.
- [29] DARKE, G. Assessment of timbre using verbal attributes. In: **Conference on Interdisciplinary Musicology. Montreal, Quebec**. [S.l.: s.n.], 2005.
- [30] SCHUBERT, E.; WOLFE, J.; TARNOPOLSKY, A. Spectral centroid and timbre in complex, multiple instrumental textures. In: **Proceedings of the international conference on music perception and cognition, North Western University, Illinois**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 112–116.
- [31] BISMARCK, G. von. Timbre of steady sounds: A factorial investigation of its verbal attributes. **Acta Acustica united with Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 30, n. 3, p. 146–159, 1974.
- [32] ELLIOTT, T. M.; HAMILTON, L. S.; THEUNISSEN, F. E. Acoustic structure of the five perceptual dimensions of timbre in orchestral instrument tones. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 133, n. 1, p. 389–404, 2013.
- [33] PAUL, S. Avaliação e modelagem de qualidade sonora em aeronaves comerciais. **Teste de Doutorado, UFSC**, Florianópolis, SC, 2009.

- [34] KINSLER, L. E. et al. Fundamentals of Acoustics. **Fundamentals of Acoustics, 4th Edition**, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999., v. 1, 1999.
- [35] ZWICKER, E.; TERHARDT, E. Analytical expressions for critical-band rate and critical bandwidth as a function of frequency. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 68, n. 5, p. 1523–1525, 1980.
- [36] CONTOURS, A.-N. E.-L.-L. International standard ISO 226: 2003. **International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.**
- [37] STEVENS, S. S. The measurement of loudness. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 27, n. 5, p. 815–829, 1955.
- [38] STANDARD. ISO 532: Method for calculating loudness level. **International Organization for Standardization, Switzerland, 1975.**
- [39] ZWICKER, E. Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit. **Acta Acustica united with Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 8, n. Supplement 1, p. 237–258, 1958.
- [40] ZWICKER, E. Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 62, n. 3, p. 675–682, 1977.
- [41] MOORE, B. C.; GLASBERG, B. R.; BAER, T. A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness. **Journal of the Audio Engineering Society**, Audio Engineering Society, v. 45, n. 4, p. 224–240, 1997.
- [42] GLASBERG, B. R.; MOORE, B. C. A model of loudness applicable to time-varying sounds. **Journal of the Audio Engineering Society**, Audio Engineering Society, v. 50, n. 5, p. 331–342, 2002.

- [43] MEUNIER, S.; MARCHIONI, A. Loudness of sounds with temporal variable intensity. In: **Forum Acusticum**. [S.l.: s.n.], 2002.
- [44] STEMLINGER, I.; FASTL, H. Accuracy of loudness percentile versus measurement time. In: INSTITUTE OF NOISE CONTROL ENGINEERING. **INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings**. [S.l.], 1997. v. 1997, n. 5, p. 532–535.
- [45] WILLEMSSEN, A. M.; RAO, M. D. Characterization of sound quality of impulsive sounds using loudness based metric. In: ICA. [S.l.], 2010.
- [46] BISMARCK, G. von. Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds. **Acta Acustica united with Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 30, n. 3, p. 159–172, 1974.
- [47] AURES, W. Procedure for calculating the sensory euphony of arbitrary sound signals. **Acustica**, v. 59, n. 2, p. 130–141, 1985.
- [48] HASTINGS, A.; DAVIES, P. An examination of Aures model of tonality. In: **Proc. Internoise**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2.
- [49] TERHARDT, E.; STOLL, G.; SEEWANN, M. Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 71, n. 3, p. 679–688, 1982.
- [50] STANDARD, E. Measurement of airborne noise emitted by information technology and telecommunications equipment. **ECMA-74, 12th edition**, 2012.
- [51] GUSKI, R. Psychological methods for evaluating sound quality and assessing acoustic information. **Acta Acustica united with Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 83, n. 5, p. 765–774, 1997.
- [52] GREY, J. M. Timbre discrimination in musical patterns. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 64, n. 2, p. 467–472, 1978.
- [53] WESSEL, D. L. Timbre space as a musical control structure. **Computer music journal**, JSTOR, p. 45–52, 1979.

- [54] ILMONIEMI, M.; VALIMAKI, V.; HUOTILAINEN, M.  
Subjective evaluation of musical instrument timbre modifications.  
In: CITESEER. **Joint Baltic-Nordic Acoustic Meeting**. [S.l.],  
2004. p. 8–10.
- [55] BARTKO, J. J. The intraclass correlation coefficient as a measure  
of reliability. **Psychological reports**, Ammons Scientific, v. 19,  
n. 1, p. 3–11, 1966.
- [56] KOCH, G. G. Intraclass correlation coefficient. **Encyclopedia of  
statistical sciences**, Wiley Online Library, 1982.
- [57] GALTON, F. Regression towards mediocrity in hereditary stature.  
**Journal of the Anthropological Institute of Great Britain  
and Ireland**, JSTOR, p. 246–263, 1886.
- [58] PEARSON, K. Note on regression and inheritance in the case of  
two parents. **Proceedings of the Royal Society of London**,  
The Royal Society, v. 58, n. 347-352, p. 240–242, 1895.
- [59] MCGRAW, K. O.; WONG, S. P. Forming inferences about some  
intraclass correlation coefficients. **Psychological methods**,  
American Psychological Association, v. 1, n. 1, p. 30, 1996.
- [60] FISHER, R. A. **Statistical methods for research workers**.  
[S.l.]: Genesis Publishing Pvt Ltd, 1936.
- [61] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics  
and probability for engineers**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- [62] [HTTP://WWW.SABIAN.COM/EN/PAGES/ANATOMY-OF-A-  
CYMBAL](http://www.sabian.com/en/pages/anatomy-of-a-cymbal). 10/06/2015.
- [63] [HTTP://WWW.ZILDJIAN.COM/PRODUCTS](http://www.zildjian.com/products). 10/06/2015.
- [64] [HTTP://WWW.VICFIRTH.COM/PRODUCTS](http://www.vicfirth.com/products). 10/06/2015.
- [65] JR, J. H. I. Timbre effects caused by drumstick tip shapes/sizes.  
**The Journal of the Acoustical Society of America**,  
Acoustical Society of America, v. 103, n. 5, p. 3006–3006, 1998.
- [66] ESPOSITO, G. D. G. E.; SANTOLINI, C.; SCALISE, L.  
Experimental vibrational analysis of drum cymbals. In:  
**Proceedings of SPIE, the International Society for  
Optical Engineering**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 4359, p. 724–730.

- [67] PERRIN, R. et al. Normal modes of an 18 inch crash cymbal. 2006.
- [68] ROSSING, T. D. Chladni law for vibrating plates. **American Journal of Physics**, American Association of Physics Teachers, v. 50, n. 3, p. 271–274, 1982.
- [69] LEGGE, K.; FLETCHER, N. Nonlinearity, chaos, and the sound of shallow gongs. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 86, p. 2439, 1989.
- [70] CHAIGNE, A.; TOUZÉ, C.; THOMAS, O. Nonlinear vibrations and chaos in gongs and cymbals. **Acoustical science and technology**, J-STAGE, v. 26, n. 5, p. 403–409, 2005.
- [71] TOUZÉ, C.; CHAIGNE, A. Lyapunov exponents from experimental time series: application to cymbal vibrations. **Acta Acustica United with Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 86, n. 3, p. 557–567, 2000.
- [72] BALDWIN, J. B. **Some acoustical properties of triangles and cymbals and their relation to performance practices**. Tese (Doutorado) — Michigan State University, 1970.
- [73] CONTER, A. A identidade do baterista. **Revista Batera e Percussão**, v. 119, p. 44–48, 2007.
- [74] [HTTP://WWW.PAISTE.COM/](http://www.paiste.com/). 10/06/2015.
- [75] CAMPBELL, M.; GREATED, C. **The musician's guide to acoustics**. [S.l.]: Oxford University Press, 1994.
- [76] DIN45631 Calculation of loudness level and loudness from the sound spectrum.
- [77] TIMONEY, J. et al. Implementing loudness models in matlab. **Proceedings of 7th Conference on Digital Audio Effects (DAFx)**, 2004.
- [78] ARTEMIS, H. A. Manual do S. **Section: Psychoacoustic Analysis in ArtemiS**.
- [79] Artemis, H. A. Manual do software. Section: Loudness and sharpness calculation with artemis.
- [80] ISO532 - Method for calculating loudness level.

- [81] HARTMANN, W. M. **Principles of Musical Acoustics**. [S.l.]: Springer, 2013.
- [82] LINDBLAD, P. The acoustic correlate of sibilance: a proposal based on perception tests. **FONETIK-90. PHONUM**, v. 1, p. 66–69, 1990.
- [83] DUFAUX, A. Detection and recognition of impulsive sounds signals. **Institute de Microtechnique Neuchatel, Switzerland**, 2001.



## APÊNDICE A – Análise modal experimental

Para uma visualização do comportamento vibratório do prato de percussão, foi realizada uma análise modal de um dos modelos utilizados como amostra neste trabalho, o *Crash 18" HX Series, Krest Cymbals*. A malha criada para análise contém 182 pontos na superfície superior, que dividem 7 elementos no sentido radial e 28 no sentido angular (em coordenadas cilíndricas). O método de excitação utilizado foi através de um martelo de impacto (ponteira de metal), modelo 086D05 da PCB Piezotronics. Para a medição da aceleração utilizou-se um acelerômetro modelo 4519 da Bruel & Kjaer. A posição do acelerômetro foi mantida como fixa no ponto 1 e o impacto realizado em todos pontos. Para a resposta pontual, o impacto foi feito na superfície inferior, sentido inverso do acelerômetro. A aquisição dos dados de medição foi feita utilizando o analisador de sinais PULSE 3039, da Bruel & Kjaer, que trabalha em paralelo com o software PULSE LabShop.

Para ambos os sensores, as FFT's foram calculadas para uma faixa de 0 a 800Hz, com um número de pontos de  $n_p = 1600$ , fazendo com que os intervalos espectral, temporal e tempo total de aquisição possuam respectivamente os valores  $df = 0,5\text{Hz}$ ,  $dt = 0,9766\text{ms}$  e  $t_t = 2\text{s}$ . A FFT de cada foi obtida através da média linear de 4 impactos, com janelamentos específicos. Para a obtenção do espectro da força de impacto, foi aplicado um janelamento transiente com comprimento de 20ms com ajuste no crescimento e decaimento de 5ms. No sinal proveniente do acelerômetro, foi aplicado um janelamento do tipo exponencial, com expoente de decaimento  $\tau = 800\text{ms}$  ( $e^{-\frac{t}{\tau}}$ ).

Após a obtenção das FFT's em cada ponto, o cálculo das frequências naturais e formas modais foi feito utilizando o software TestLab da LMS, no qual foi construído um modelo virtual da malha utilizada, através de suas coordenadas reais.

A Figura A.1 mostra o somatório de FRF obtido na faixa de 0 a 400Hz. A Figura A.2 mostra o somatório de FRF obtido na faixa de 400 a 800Hz. Pode-se observar um crescimento da densidade modal, ao longo do crescimento no eixo da frequência. Também observa-se algumas irregularidades em relação ao tamanho da malha utilizada e à forma de movimento nos modos em frequências mais altas. As Figuras A.3, A.4, A.5, A.6, A.7, A.8 e A.9 mostram algumas formas modais obtidas através da análise. Pode-se observar, nas primeiras frequências naturais, que os movimentos gerados ocorrem apenas nas extremidades do prato. A partir da oitava frequência natural, começam

a surgir movimentos apenas na parte central seguidos por movimentos em ambas as áreas (corpo e extremidade).

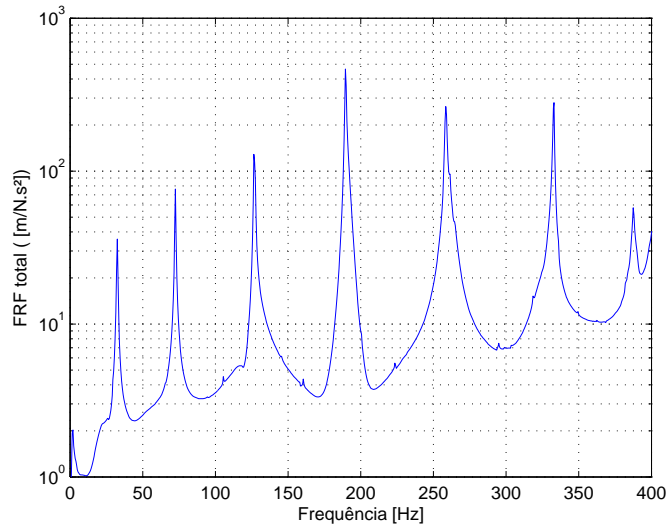


Figura A.1 – Somatório das funções resposta em frequência do prato *Krest HX Series Crash 18"* para o intervalo de 0 a 400Hz, obtido com a análise modal. Fonte: Autor

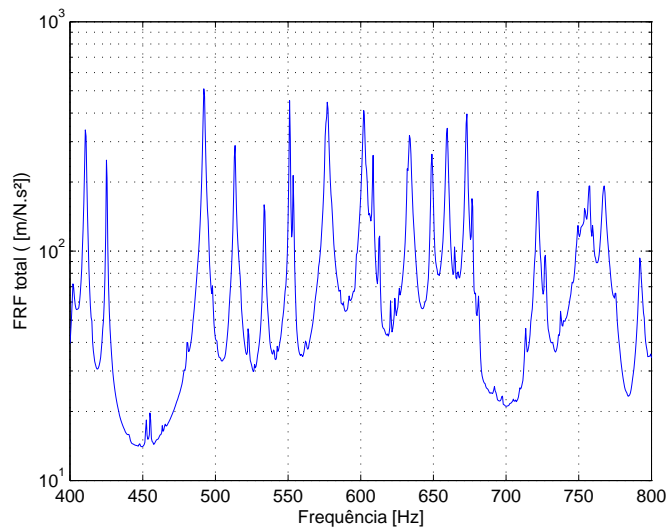


Figura A.2 – Somatório das funções resposta em frequência do prato *Krest HX Series Crash 18"* para o intervalo de 400Hz a 800Hz, obtido com a análise modal. Fonte: Autor

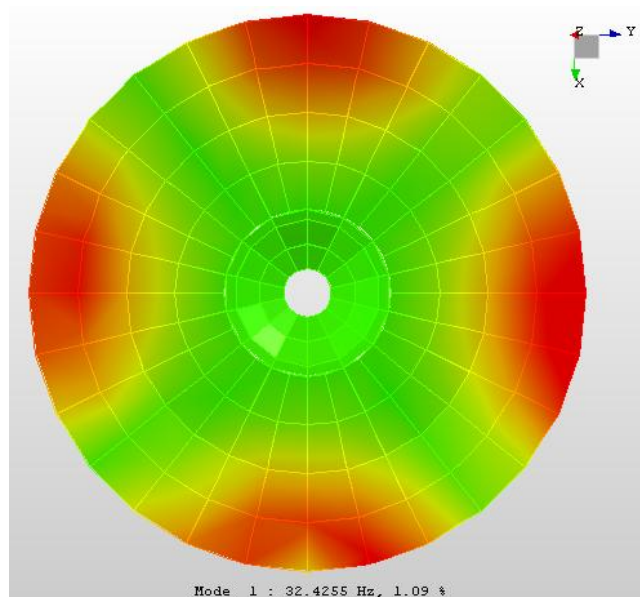


Figura A.3 – Forma modal obtida para a primeira frequência natural  $f_1 = 32,4255Hz$ . Fonte: Autor

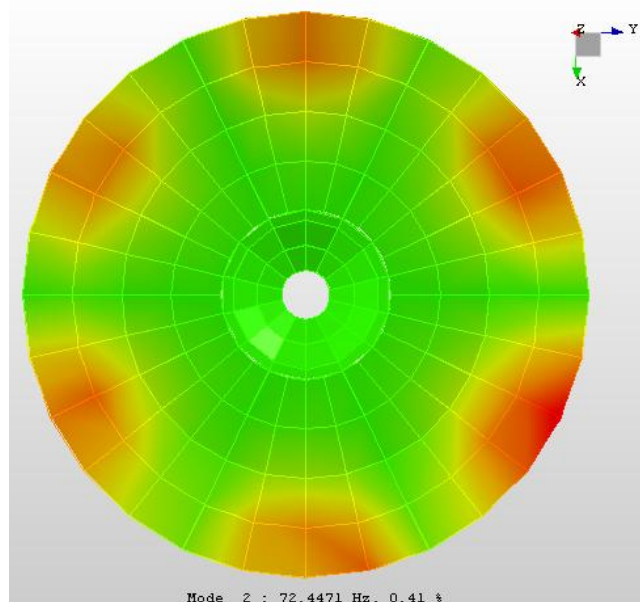


Figura A.4 – Forma modal obtida para a segunda frequência natural  $f_2 = 72,4471Hz$ . Fonte: Autor.

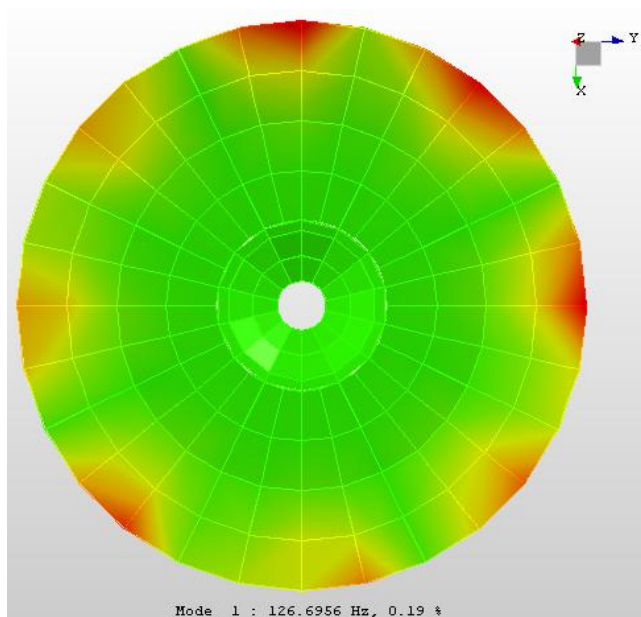


Figura A.5 – Forma modal obtida para a terceira frequência natural  $f_3 = 126,6956Hz$ . Fonte: Autor.

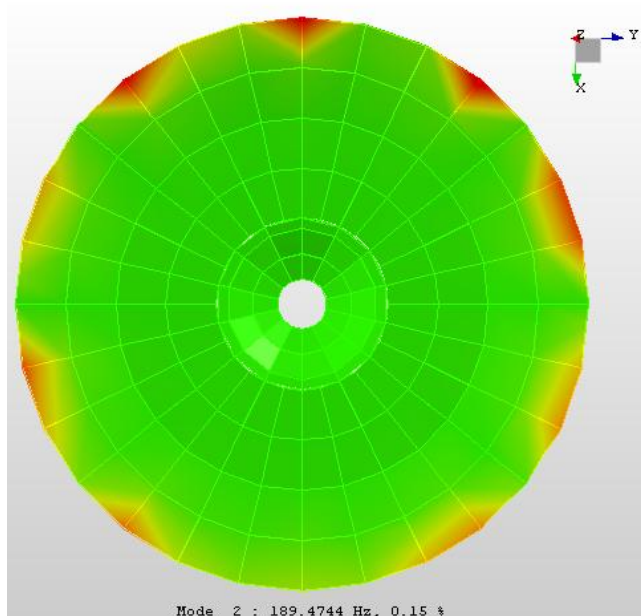


Figura A.6 – Forma modal obtida para a quarta frequência natural  $f_4 = 189,4744Hz$ . Fonte: Autor.

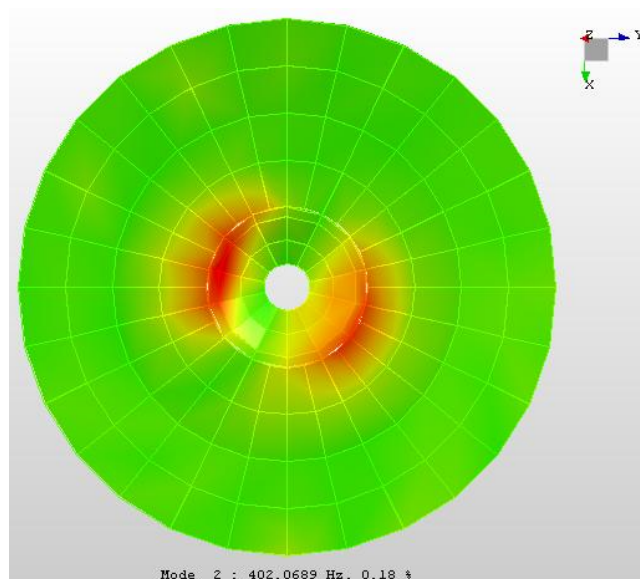


Figura A.7 – Forma modal obtida para a oitava frequência natural  $f_8 = 402,0689Hz$ . Fonte: Autor.

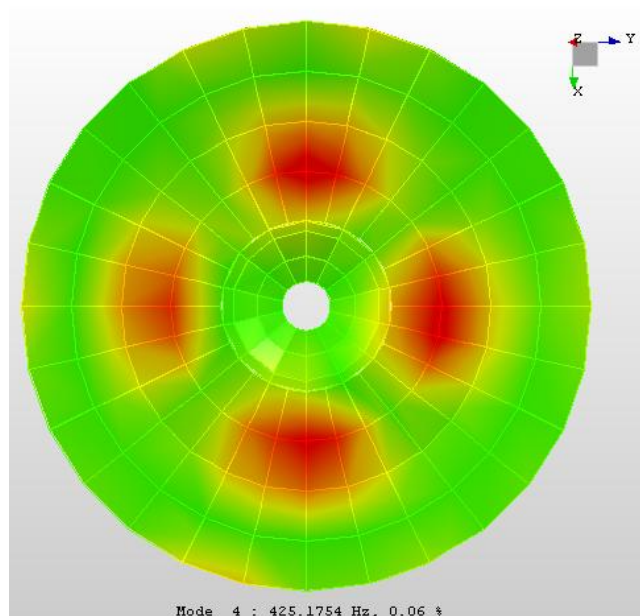


Figura A.8 – Forma modal obtida para a décima frequência natural  $f_{10} = 425,1754Hz$ . Fonte: Autor.

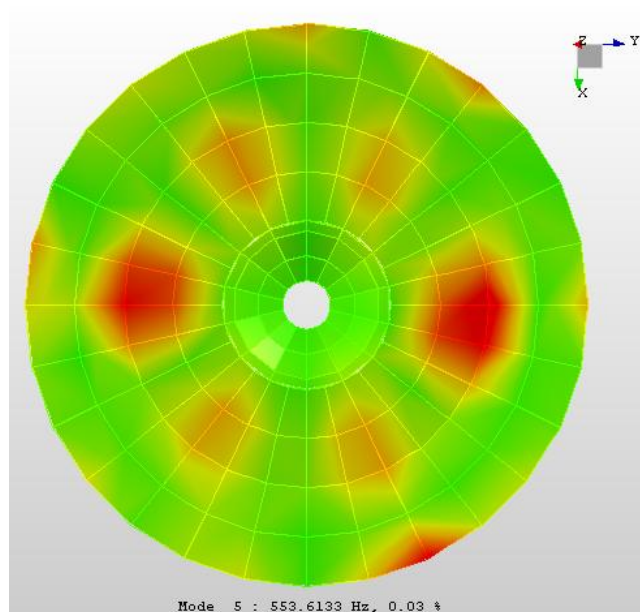


Figura A.9 – Forma modal obtida para a décima quinta frequência natural  $f_{15} = 553,6133Hz$ . Fonte: Autor.

## APÊNDICE B – Comportamento vibratório não-linear

Com o intuito de observar o comportamento vibratório não-linear do prato de percussão, foram feitos alguns testes para obter a variação da FRF em função da força de excitação. O modelo de prato analisado foi o *Krest Deep Cult Crash 18"*. O primeiro experimento foi feito de acordo com o esquema mostrado na Figura B.1, utilizando um shaker modelo 4809 Bruel & Kjaer, cabeça de impedância modelo 288D01 PCB Piezotronics e acelerômetro modelo 352A21 PCB Piezotronics. O shaker foi suspenso por cabos de nylon em uma estrutura rígida. O prato foi acoplado em um pedestal de utilização do instrumento, posicionando a superfície central de forma perpendicular, de modo que o acoplamento do shaker permaneça normal à superfície. O acelerômetro foi posicionado no mesmo ponto de contato da cabeça de impedância, porém na superfície inferior do prato. A aquisição de dados foi feita utilizando o analisador de sinais PULSE 3039, juntamente com o software PULSE LabShop. Um amplificador de potência modelo 2706 Bruel & Kjaer foi utilizado para controlar a amplitude do sinal de força gerado pelo analisador antes de atingir a entrada do shaker.

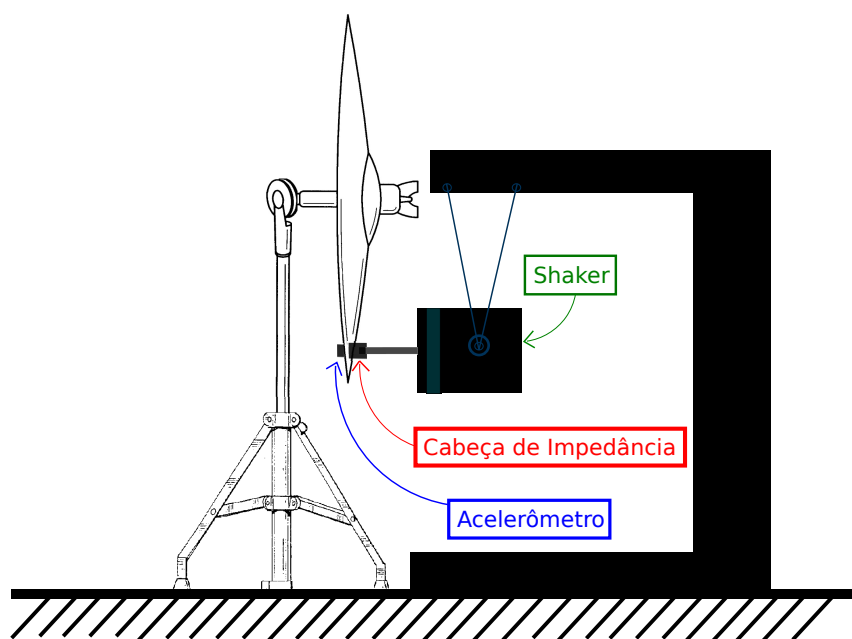


Figura B.1 – Esquema da estrutura do experimento para o comportamento não-linear do prato. Fonte: Autor

Primeiramente foi obtida a resposta pontual de aceleração. O sinal utilizado para a força de excitação foi um ruído branco, com um filtro passa baixa, frequência de corte  $f_c = 1,6\text{kHz}$ . Tanto para o sinal da força quanto da aceleração, foram utilizados janelamentos do tipo Hanning, obtendo-se a FRF para uma faixa de frequências de 0 à  $1,6\text{kHz}$ , com número de pontos  $n_p = 1600$  ( $df = 1\text{Hz}$ ,  $t_t = 1\text{s}$  e  $dt = 0,244\text{ms}$ ). O resultado pode ser visto na Figura B.2.

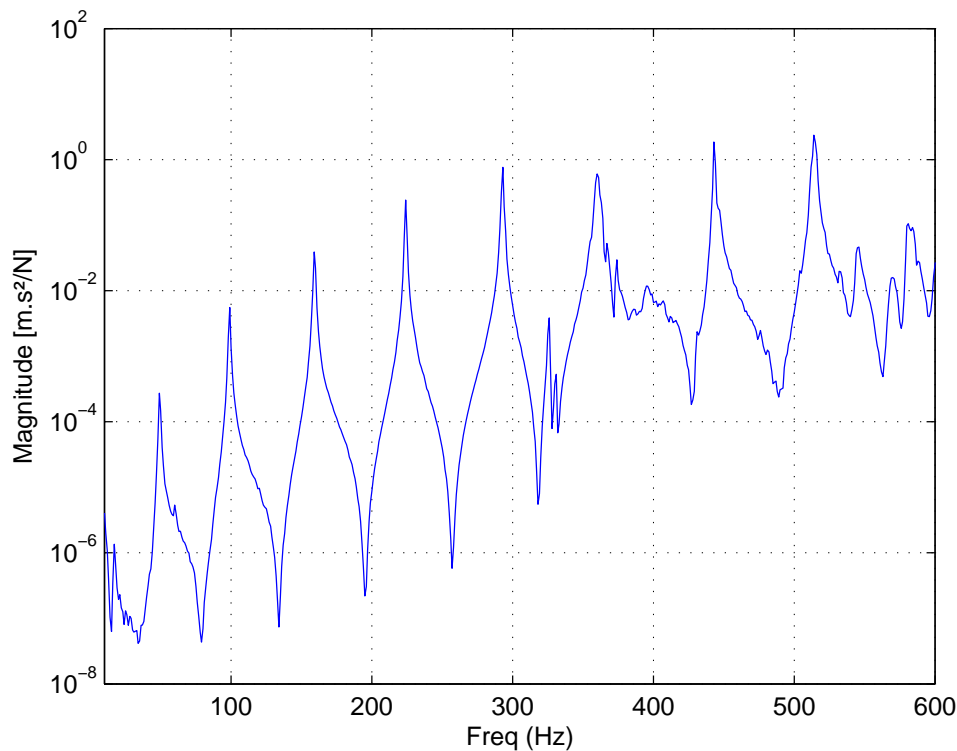


Figura B.2 – Resposta pontual obtida no experimento do prato *Krest Deep Cult Crash 18"*. Fonte: Autor

Após obter a resposta pontual em excitação estacionária com amplitude baixa de força, foram feitos testes medindo a variação da resposta espectral ao longo do tempo para uma excitação senoidal com amplitude variável. Foram selecionadas duas frequências para a excitação senoidal,  $f_{s1} = 100\text{Hz}$  e  $f_{s2} = 150\text{Hz}$ . A variação da amplitude da força de excitação foi feita manualmente pelo amplificador conectado ao shaker. A Figura B.3 e Figura B.4 mostram respectivamente a amplitude das variáveis ao longo do tempo e o espectrograma da aceleração (normalizada em relação ao valor máximo atingido) para a frequência de excitação  $f_{s1} = 100\text{Hz}$ . A Figura B.5 e Figura B.6 mostram respectivamente a amplitude das variáveis ao longo do tempo e o



espectrograma da aceleração (normalizada em relação ao valor máximo atingido) para a frequência de excitação  $f_{s2} = 150\text{Hz}$ .

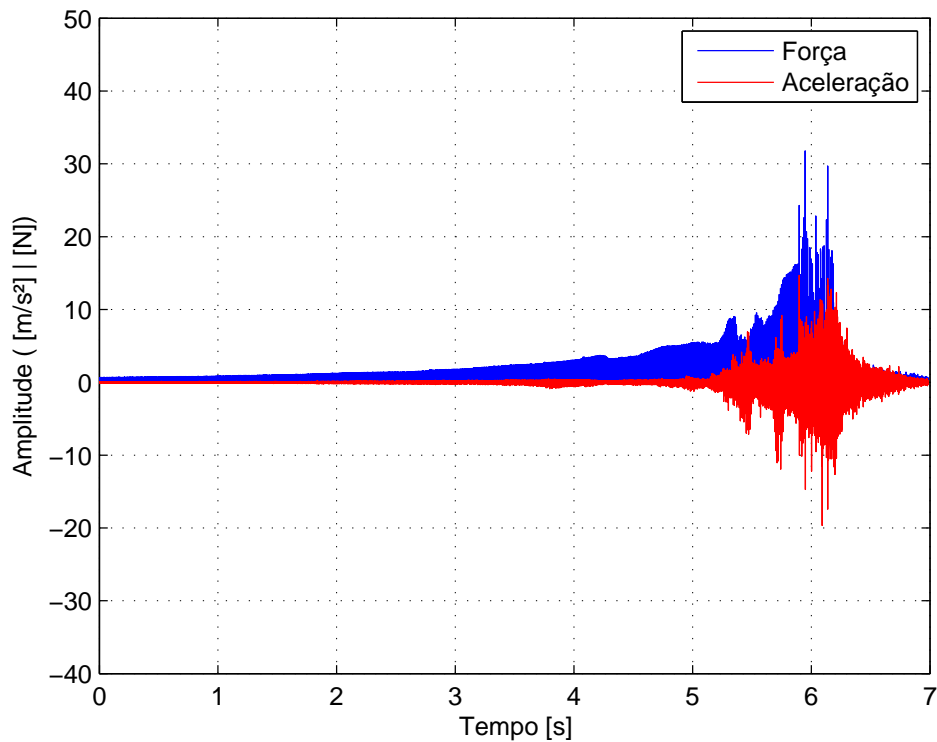


Figura B.3 – Comportamento temporal de amplitude da força e aceleração ao longo da excitação senoidal de  $f_{s1} = 100\text{Hz}$ . Fonte: Autor

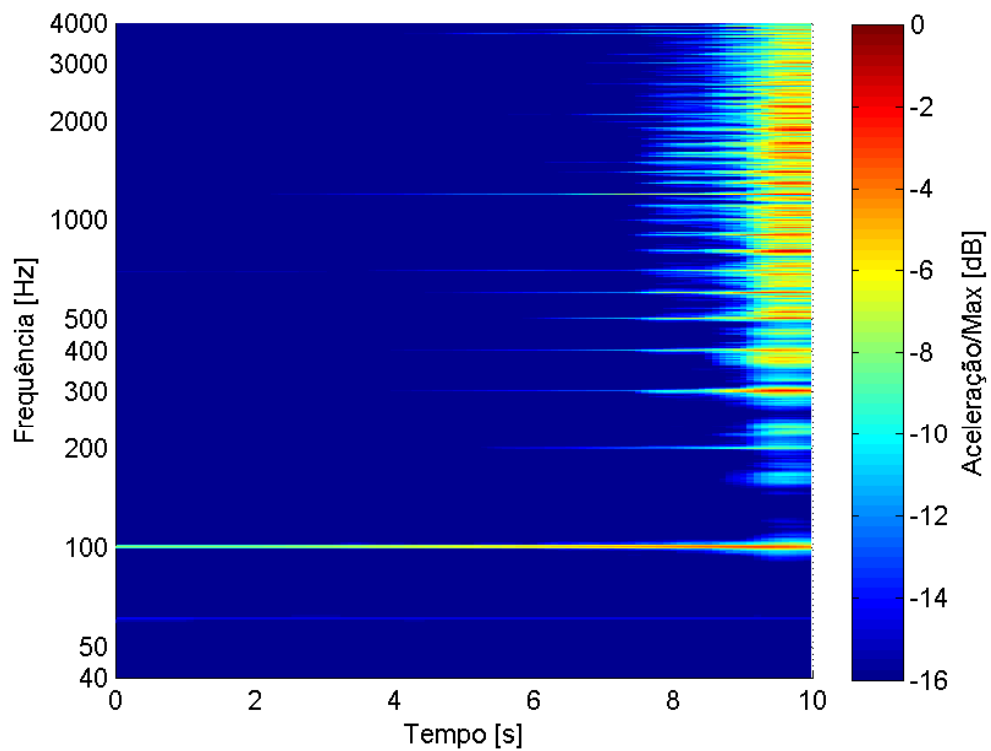


Figura B.4 – Espectrograma da aceleração (normalizada em relação ao ponto máximo) para uma excitação senoidal de  $f_{s1} = 100\text{Hz}$ , com amplitude variável. Fonte: Autor

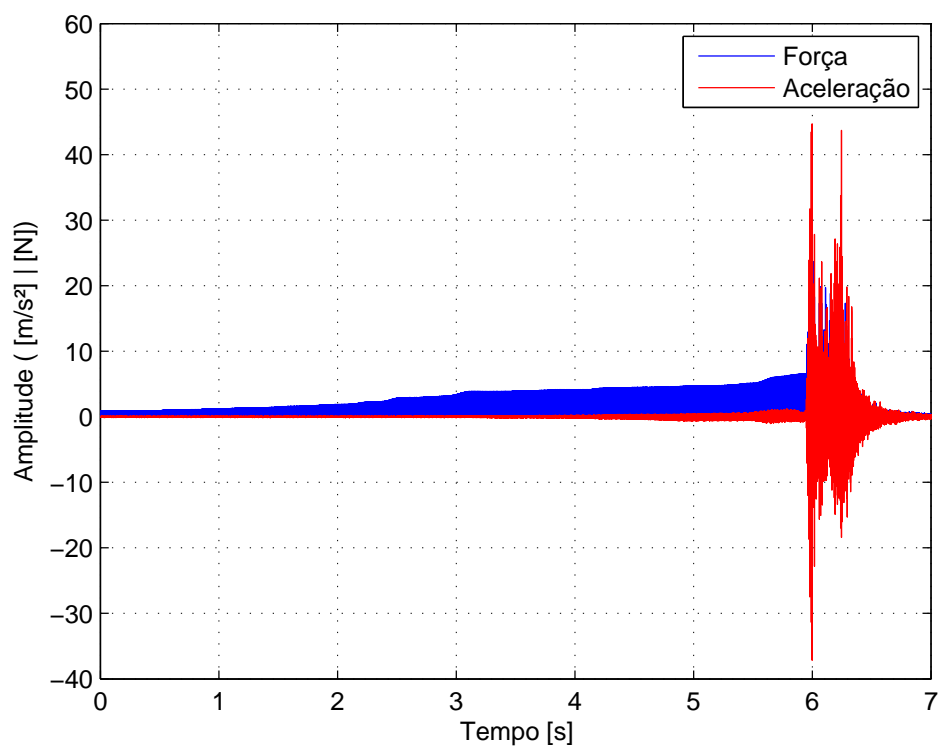


Figura B.5 – Comportamento temporal de amplitude da força e aceleração ao longo da excitação senoidal de  $f_{s2} = 150\text{Hz}$ . Fonte: Autor

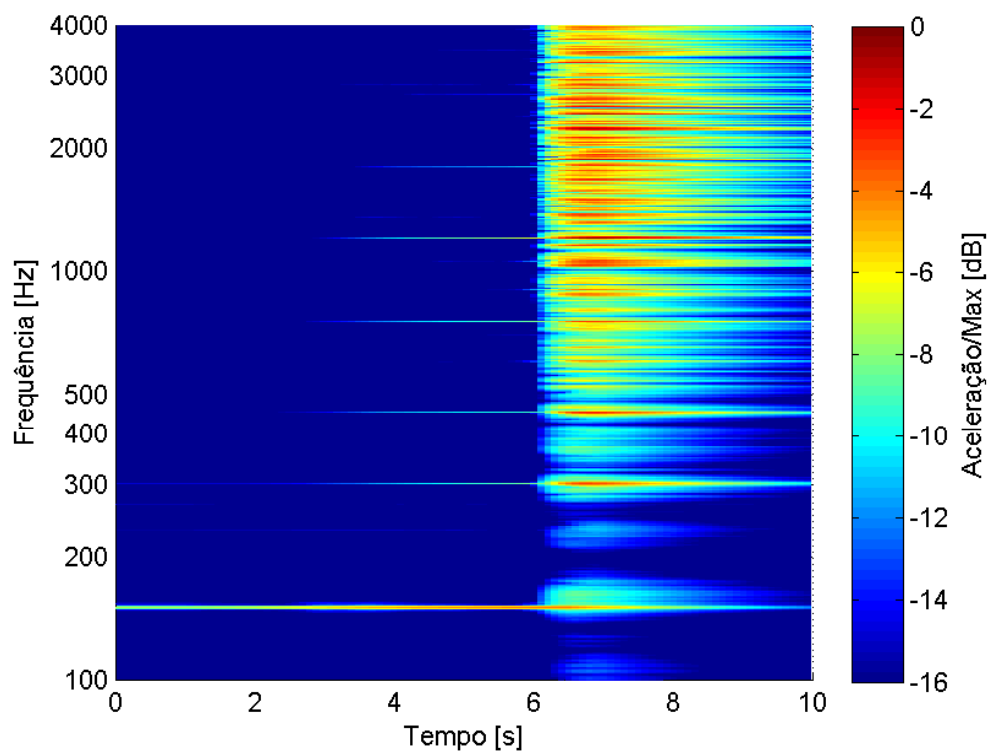


Figura B.6 – Espectrograma da aceleração (normalizada em relação ao ponto máximo) para uma excitação senoidal de  $f_{s2} = 150\text{Hz}$ , com amplitude variável. Fonte: Autor

Em ambos os casos, pode-se observar uma mudança nos regimes dinâmicos de resposta de acordo com a aceleração medida. O regime primário, durante excitação com baixa amplitude de força, é praticamente linear. Após o crescimento da amplitude da força, começam a surgir novas componentes no espectro de resposta, múltiplas inteiras da frequência de excitação. Isso pode ser considerado como sendo um regime quasi-periódico. Quando a amplitude de força atinge um nível específico, o prato demonstra um comportamento caótico, onde não encontra-se uma relação linear entre excitação e resposta. O que observa-se neste regime é uma mistura de múltiplos inteiros da frequência de excitação (quasi-periódico), com as frequências naturais de resposta do prato.

A fim de se observar o efeito deste comportamento vibratório no timbre do prato, outro experimento foi feito obtendo o espectro de pressão sonora radiada, para diferentes amplitudes de impacto. O experimento foi realizado em uma câmara anecoica, onde o impacto foi realizado por um mallet (modelo *Ibanez Tympani*) com um acelerômetro B&K 4519 acoplado na extremidade como mostra a Figura B.7. A pressão sonora foi obtida com um microfone de 1/2" modelo 40D da *G.R.A.S* posicionado normal à superfície do prato, no ponto mais extremo a uma altura de 150mm. Os impactos foram realizados na extremidade do prato, porém no sentido oposto à posição do microfone.



Figura B.7 – Mallet utilizado no experimento, com acelerômetro acoplado. Composto por uma haste de madeira, com um cilindro de feltro na ponta. Fonte: Autor

A Figura B.8 mostra a aceleração medida ao longo do tempo durante dois impactos de intensidade diferenciada (forte e fraco). O

intervalo de contato no impacto ocorre durante o primeiro pico positivo de amplitude seguido por um pico na direção oposta, ou seja, uma etapa de aceleração seguida por uma etapa de desaceleração. Depois do contato tem-se o movimento da estrutura do mallet sujeita ao amortecimento da haste de madeira.

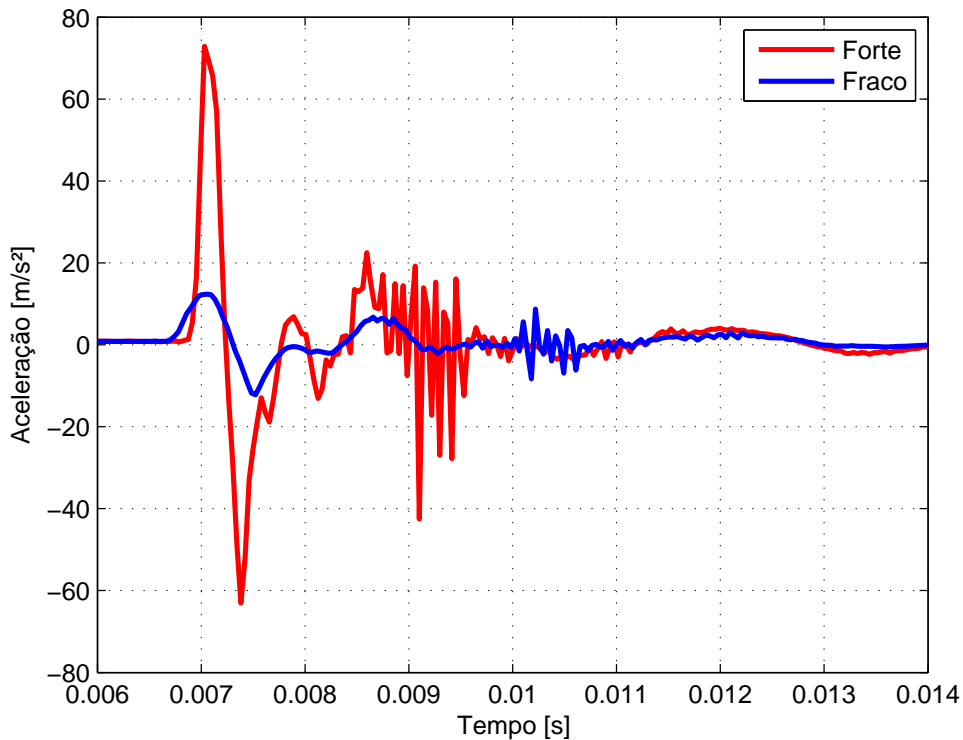


Figura B.8 – Aceleração medida na ponta do mallet durante intervalo de impacto, para duas intensidades de impacto. Fonte: Autor

A Figura B.9 e Figura B.10 mostram o espectrograma da pressão sonora normalizada em relação ao valor máximo, respectivamente para as duas intensidades de impacto, fraco e forte. Pode-se observar o surgimento de uma densidade espectral relativa maior para a resposta do impacto de maior intensidade ao ser comparada com a resposta do de menor intensidade. Considerando o espectro de excitação do mallet como constante de acordo com a intensidade, para que o prato demonstre um comportamento linear na resposta de pressão, a amplitude de cada banda de frequência deve crescer linearmente em relação à variação da intensidade da força. O mesmo não acontece neste experimento, pois as amplitudes relativas nas bandas de alta frequência tornaram-se maiores devido ao aumento da intensidade de impacto.

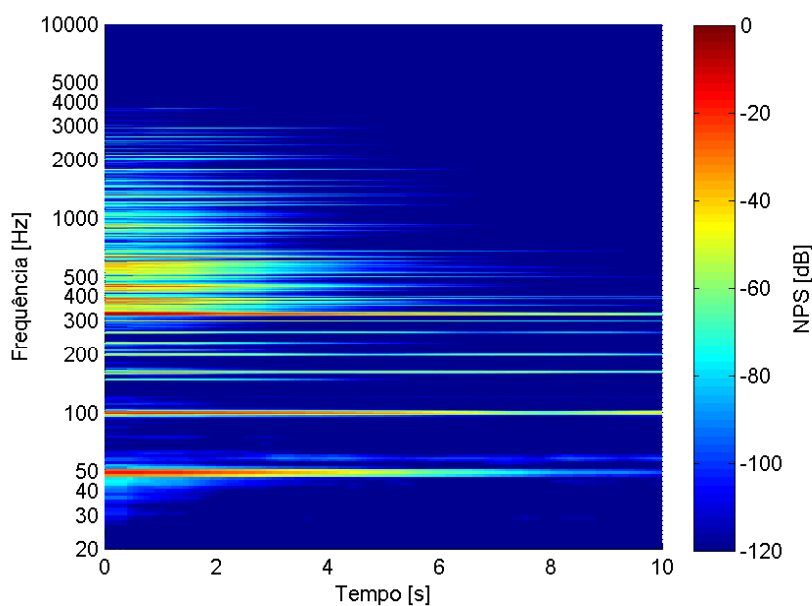


Figura B.9 – Espectrograma do nível de pressão sonora relativo ( $p_{\text{ref}} = p_{\text{max}}$ ) devido à excitação do impacto de menor intensidade (Fraco). Fonte: Autor

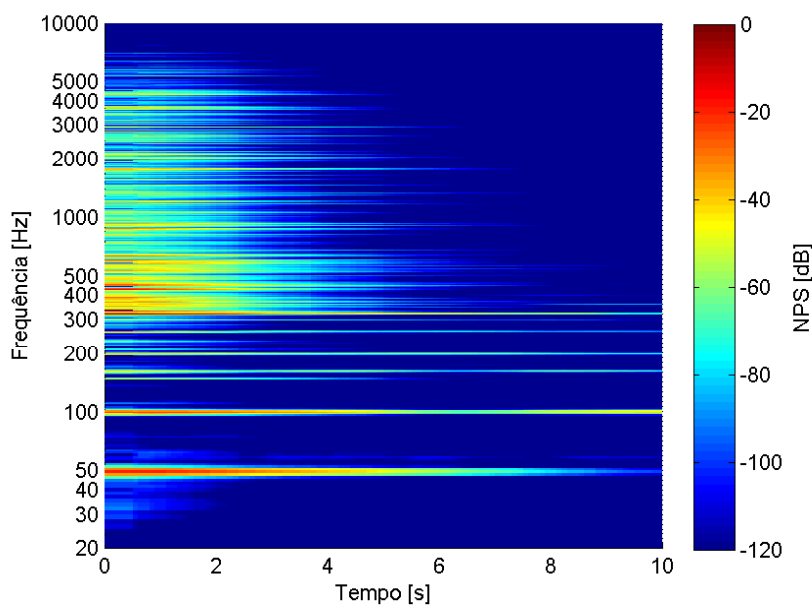


Figura B.10 – Espectrograma do nível de pressão sonora relativo ( $p_{\text{ref}} = p_{\text{max}}$ ) devido à excitação do impacto de maior intensidade (Forte). Fonte: Autor





## APÊNDICE C – Aceleração e força de impacto da baqueta

A geração de impactos para a gravação das amostras utilizadas neste trabalho, foi feita com uma baqueta modelo *Liverpool Classic Series*, formato 5B e madeira Marfim. Com o objetivo de observar a força de impacto durante o contato da baqueta com a superfície do prato, acoplou-se um acelerômetro no corpo da baqueta. O posicionamento deste sensor, em relação às áreas onde foram realizados os impactos (ponta e meio), pode ser visto na Figura C.1. Novamente utilizou-se o acelerômetro modelo 4519 da Bruel & Kjaer. Algumas espumas foram acopladas ao sensor para diminuir a amplitude máxima de aceleração, mantendo-a dentro da faixa dinâmica de aplicação.

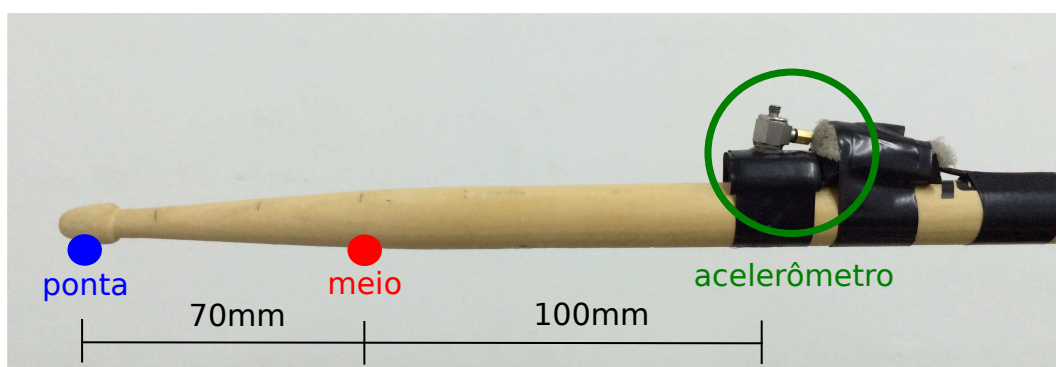


Figura C.1 – O posicionamento do acelerômetro no corpo da baqueta em relação às áreas de impacto: ponta e meio. Fonte: Autor

Um experimento foi feito com o objetivo de encontrar uma relação entre a aceleração no corpo da baqueta com a força em cada uma das áreas de impacto. O esquema do experimento pode ser visto na Figura C.3, que mostra uma célula de força modelo 8200 da Bruel & Kjaer posicionada sobre um bloco metálico de ferro (massa de 5kg). Foram feitas gravações de vários impactos com diferente intensidade, para ambas as áreas. O comportamento da aceleração é similar ao obtido para o mallet (mostrado na Figura B.8), caracterizado por uma etapa de aceleração seguida por uma desaceleração. Nesse caso, como o material da baqueta é muito mais rígido que a ponteira de feltro existente no mallet, tem-se que a magnitude no pico de aceleração é maior, como também, o intervalo de contato é menor.

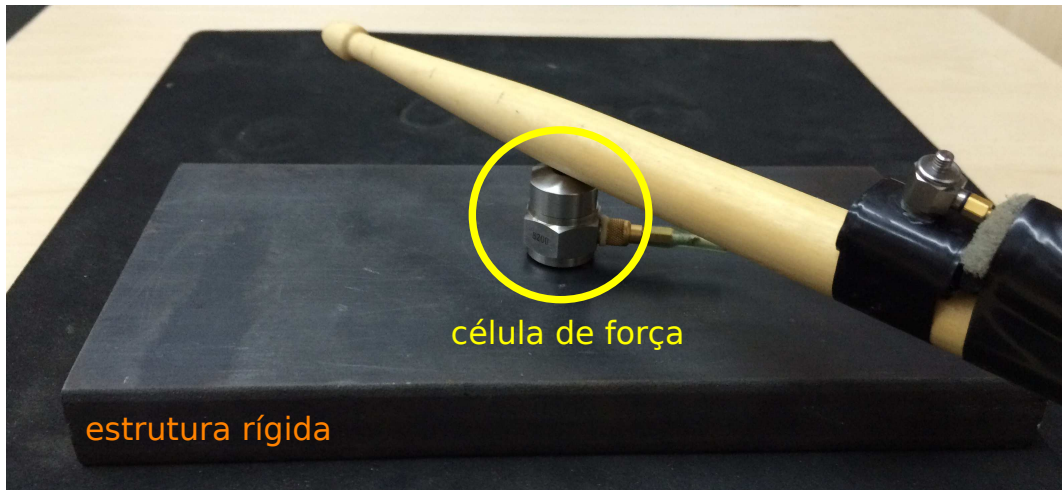


Figura C.2 – Esquema do experimento para obtenção da relação entre força de impacto e aceleração no corpo da baqueta. Fonte: Autor

Após a medição de um número de impactos aleatórios em ambas as áreas de contato, foram analisadas as relações entre os valores máximos de força e aceleração. A Figura C.3 e Figura C.4 mostram, respectivamente os valores máximos de aceleração em relação aos valores máximos na célula de força, para ponta e meio. Para os dados obtidos com a ponta da baqueta encontrou-se um coeficiente de determinação muito baixo ( $R^2 = 0,287$ ), tornando duvidosa a possibilidade de uma relação linear entre a força neste ponto de impacto com a aceleração medida. Já para o impacto realizado no meio, obteve-se um coeficiente de  $R^2 = 0,8$ , justificando a existência de uma correlação entre as grandezas.

Utilizando as regressões de ambas as áreas de impacto, foram calculadas as forças obtidas para cada amostra gravada. A Figura C.5 e Figura C.6 mostram, respectivamente os dados de força de contato para as amostras de condução e ataque. O resultado para as amostras de condução deve ser desconsiderado, pois o impacto foi feito com a ponta da baqueta, e a regressão linear obtida para este tipo possui uma baixa confiabilidade. A força de impacto para as amostras de ataque apresenta uma grande variação. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que o ponto de contato não foi mantido de forma constante, tanto em relação à distância do acelerômetro, quanto ao ângulo de contato com a extremidade do prato.

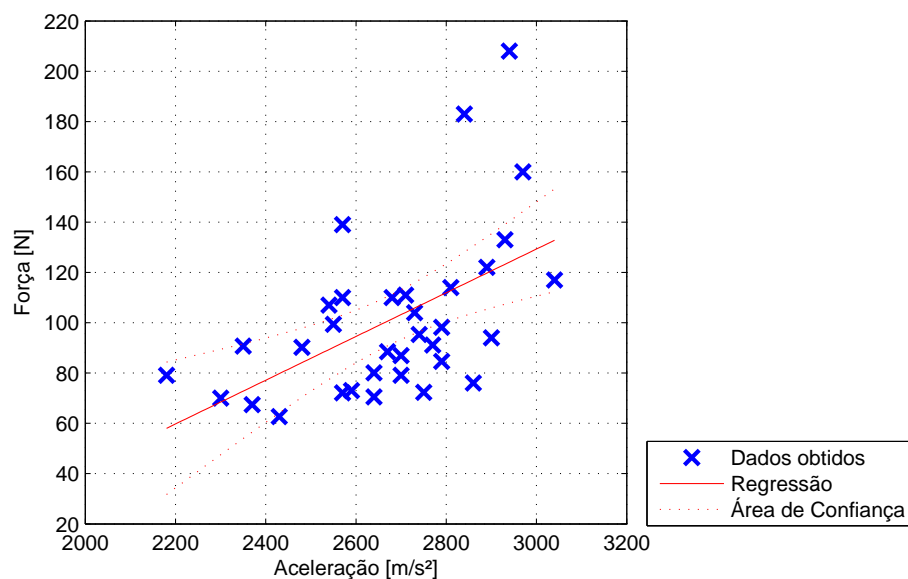


Figura C.3 – Relação obtida entre amplitude máxima de aceleração (positiva) e amplitude máxima de força para a ponta da baqueta. Fonte: Autor

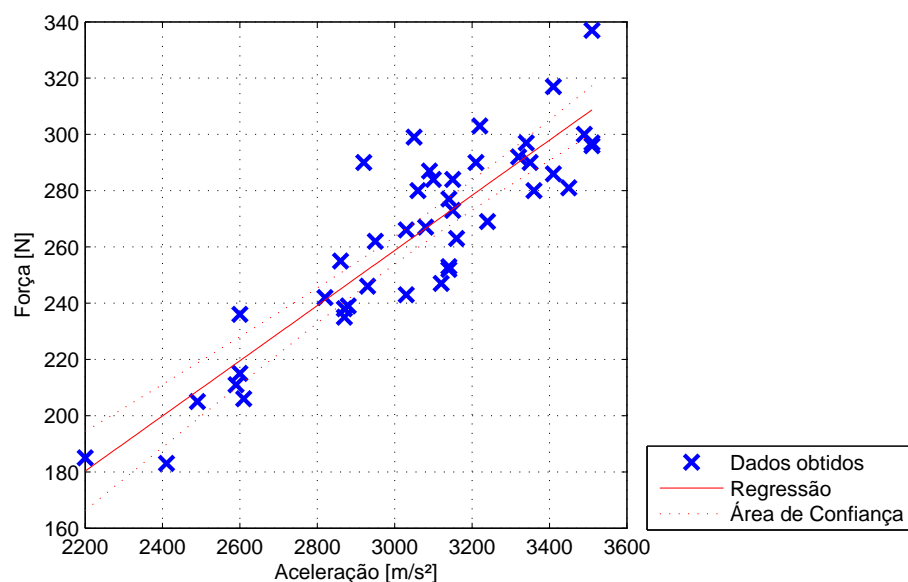


Figura C.4 – Relação obtida entre amplitude máxima de aceleração (positiva) e amplitude máxima de força para o meio da baqueta. Fonte: Autor

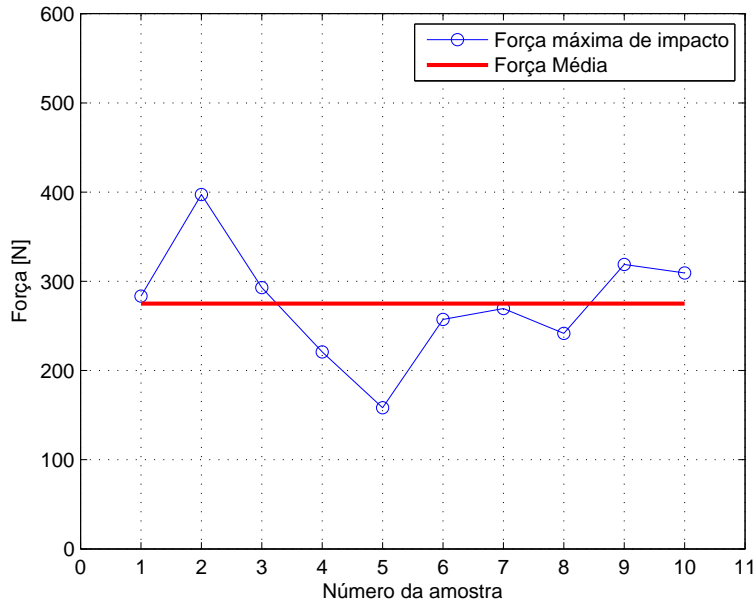


Figura C.5 – Cálculo da força de impacto para as amostras de condução, baseado na regressão linear obtida para a ponta da baqueta. Fonte: Autor

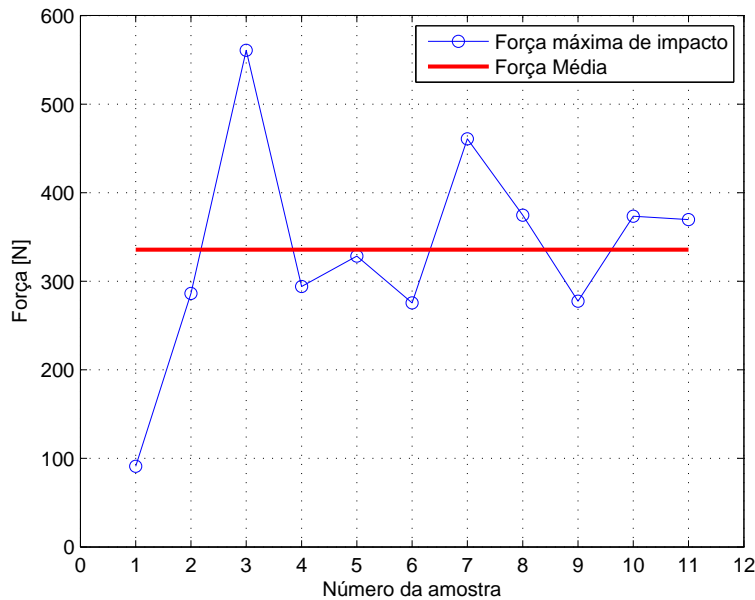


Figura C.6 – Cálculo da força de impacto para as amostras de ataque, baseado na regressão linear obtida para o meio da baqueta. Fonte: Autor

## APÊNDICE D – Resultados análise objetiva

### D.1 Espectrogramas de Loudness para amostras de condução

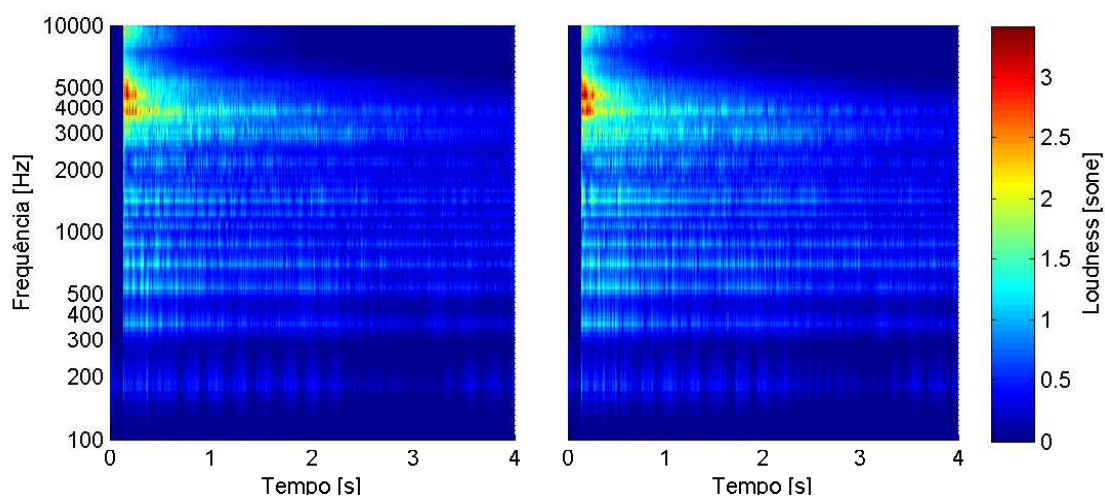


Figura D.1 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 1 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito.  
Fonte: Autor

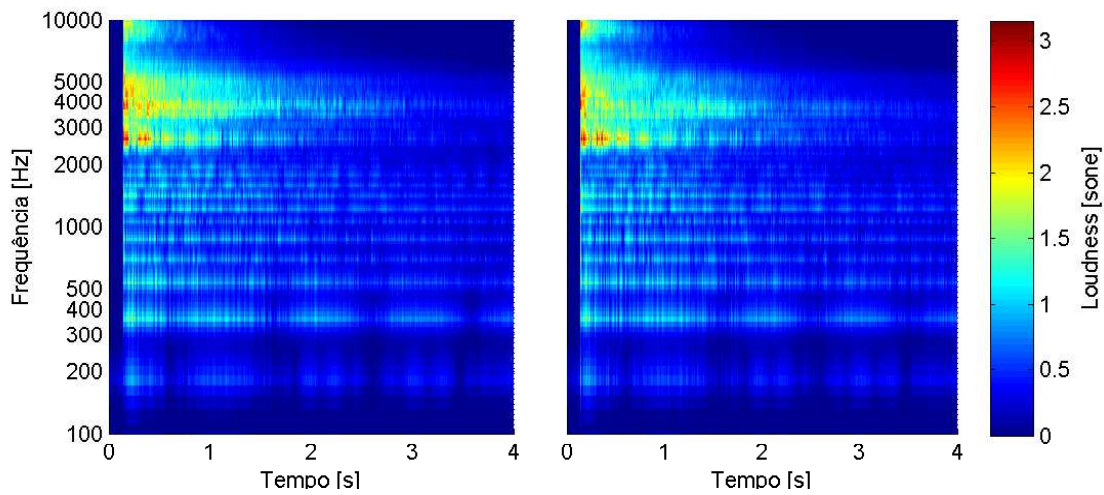


Figura D.2 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 2 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito.  
Fonte: Autor

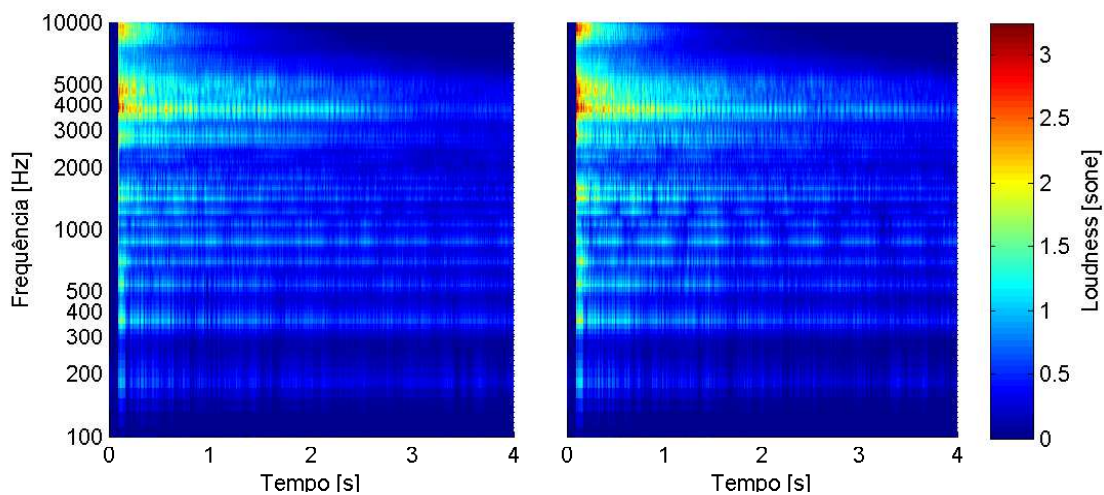


Figura D.3 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 3 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito.  
Fonte: Autor

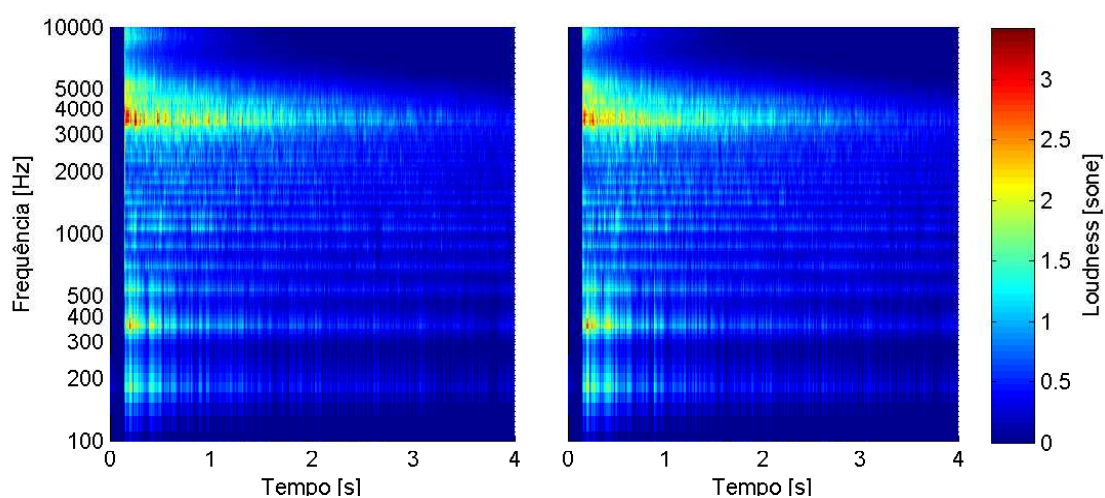


Figura D.4 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 4 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

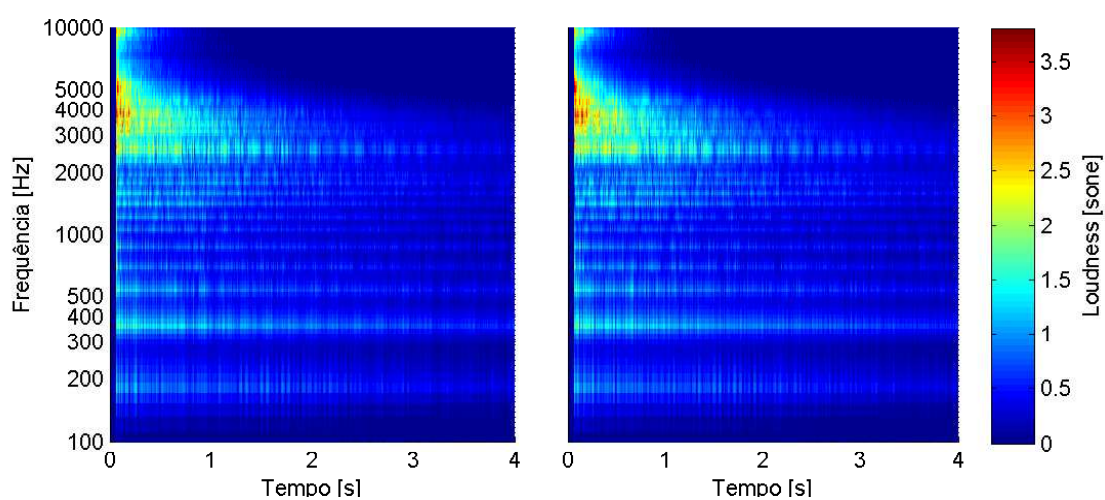


Figura D.5 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 5 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

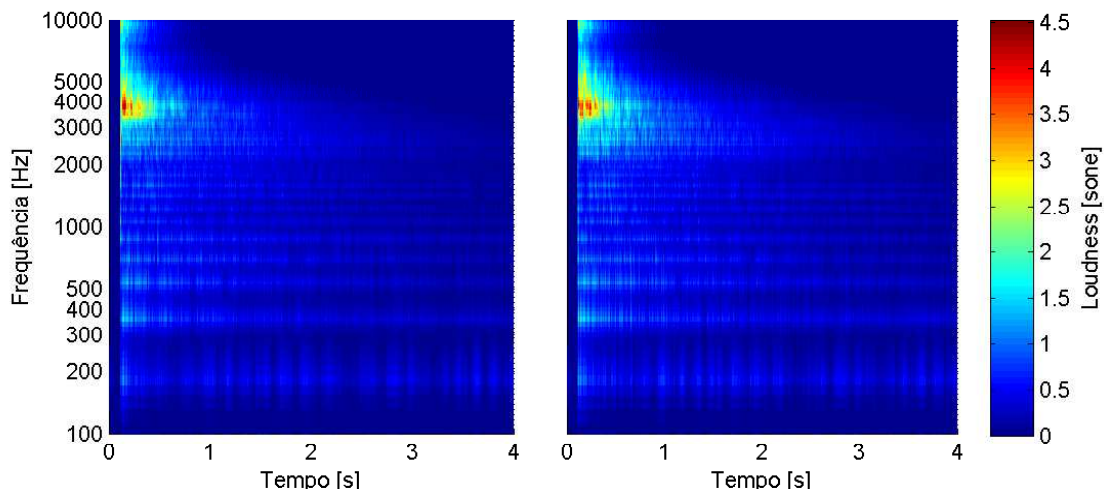


Figura D.6 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 6 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito.  
Fonte: Autor

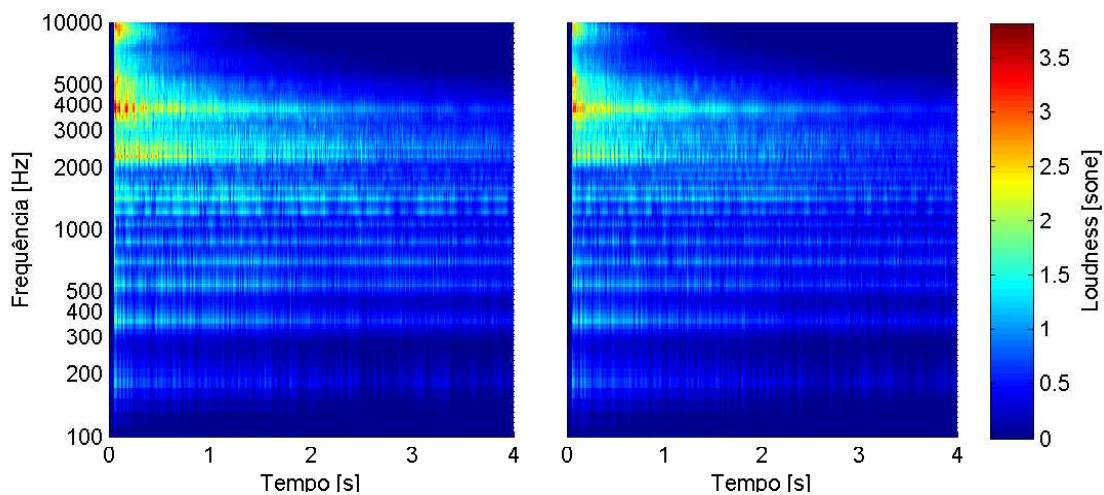


Figura D.7 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 7 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito.  
Fonte: Autor



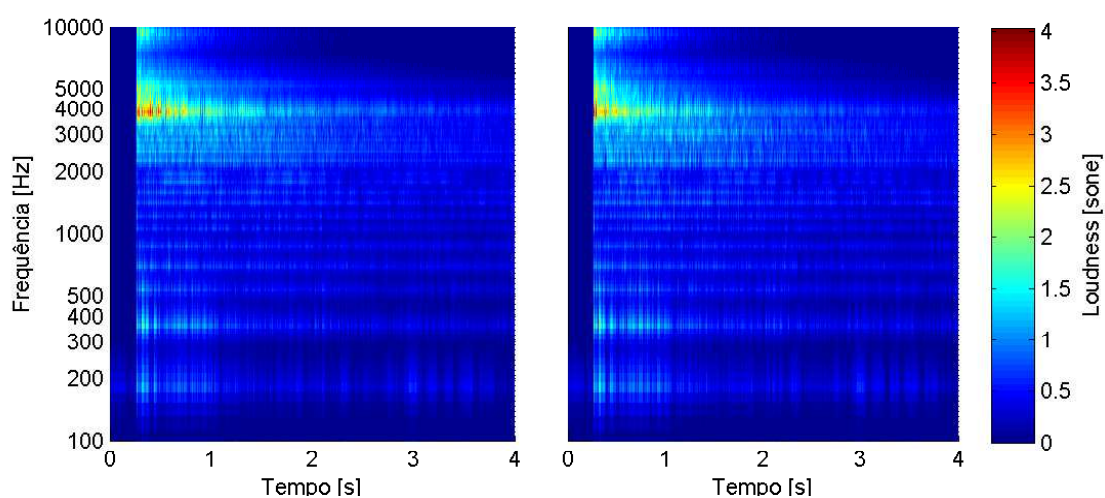


Figura D.8 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 8 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

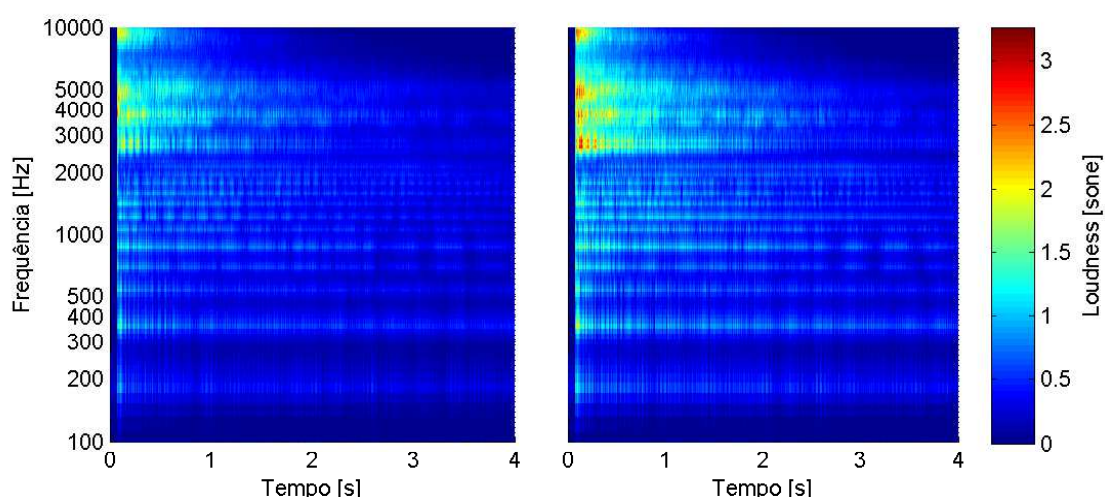


Figura D.9 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 9 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

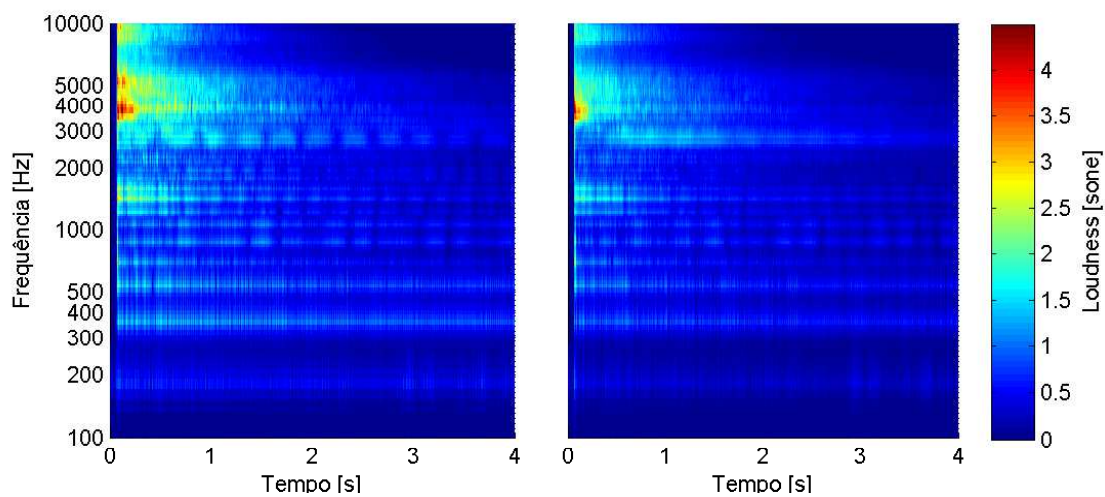


Figura D.10 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 10 de condução. Sinais dos canais esquerdo e direito. Fonte: Autor

## D.2 Espectrogramas de Loudness para amostras de ataque

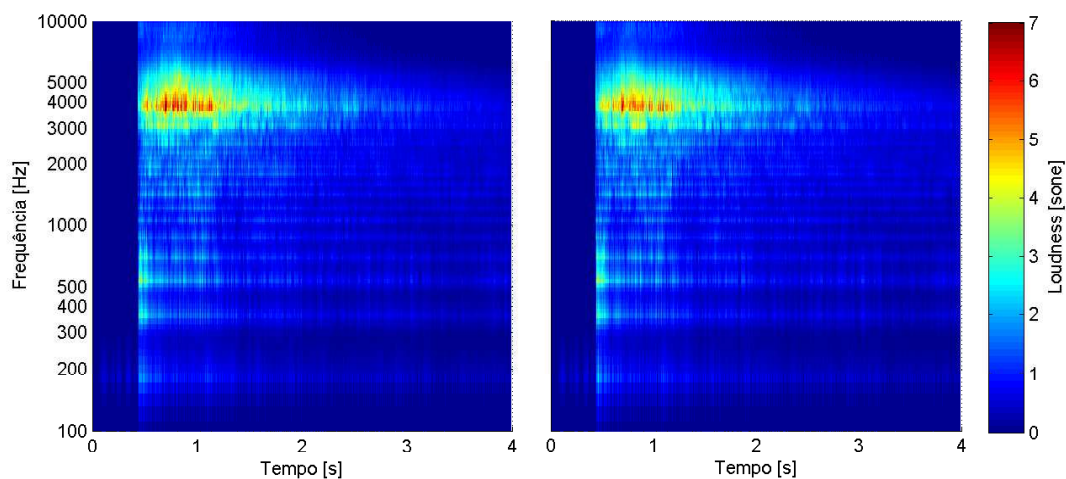


Figura D.11 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 1 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

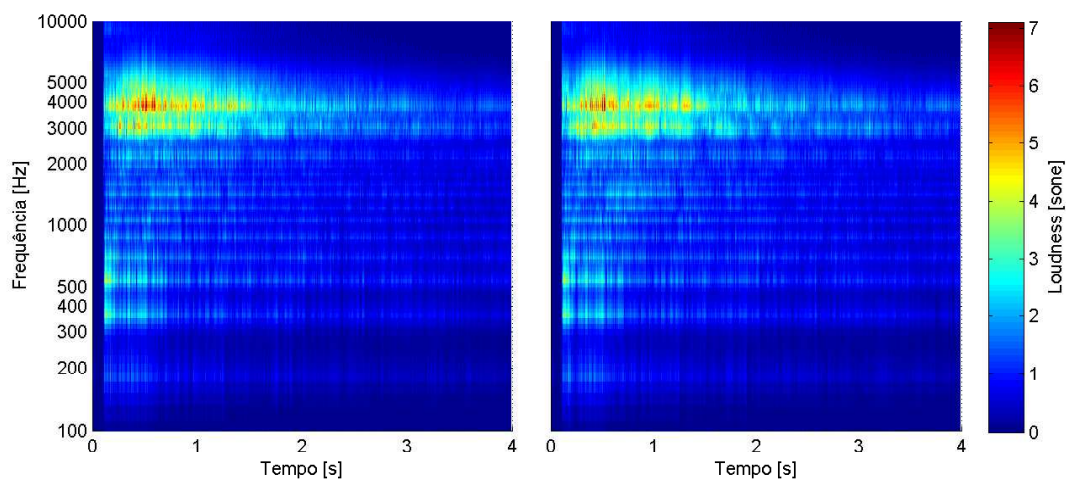


Figura D.12 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 2 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

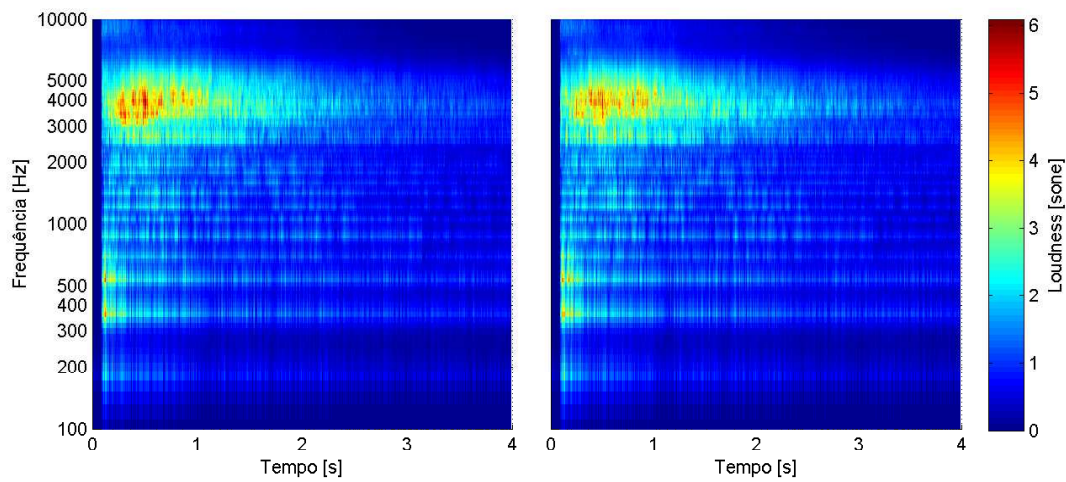


Figura D.13 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 3 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

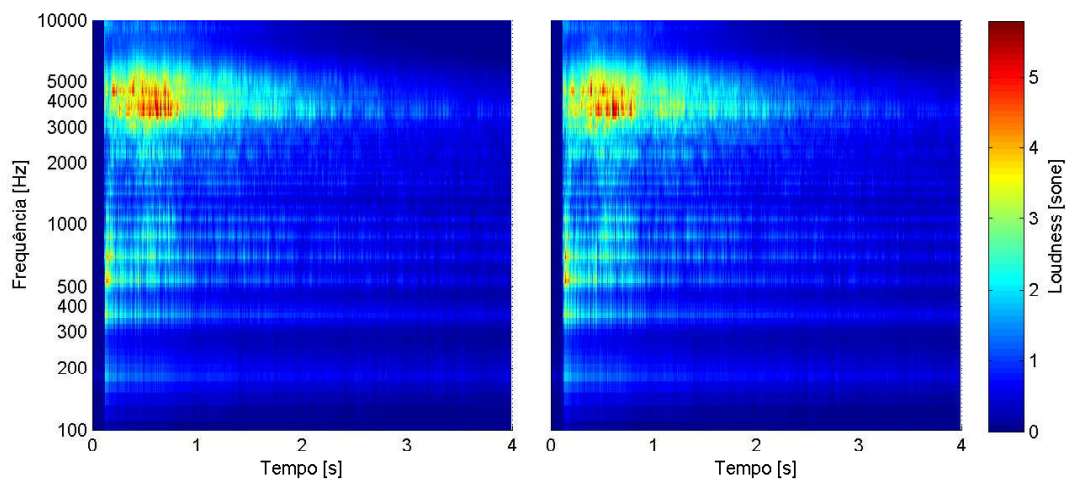


Figura D.14 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 4 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

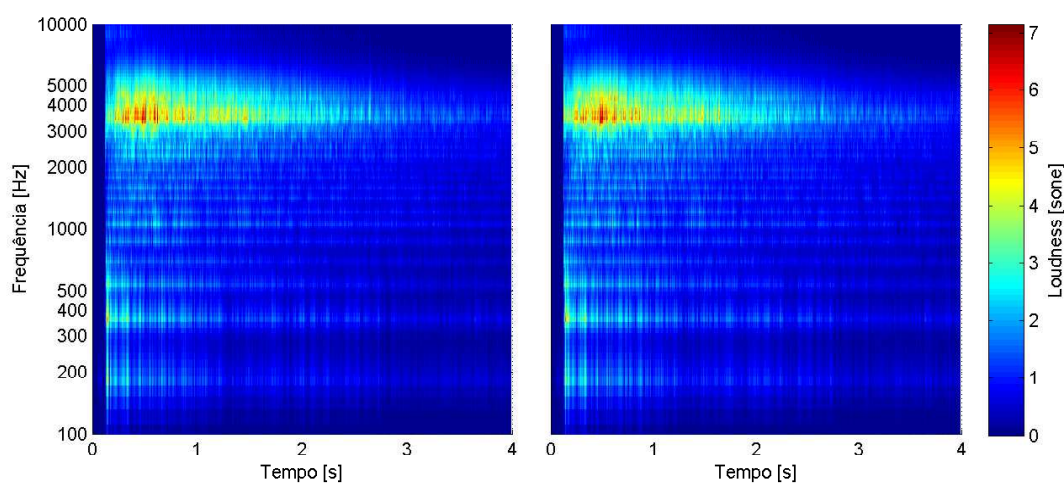


Figura D.15 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 5 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.  
Fonte: Autor

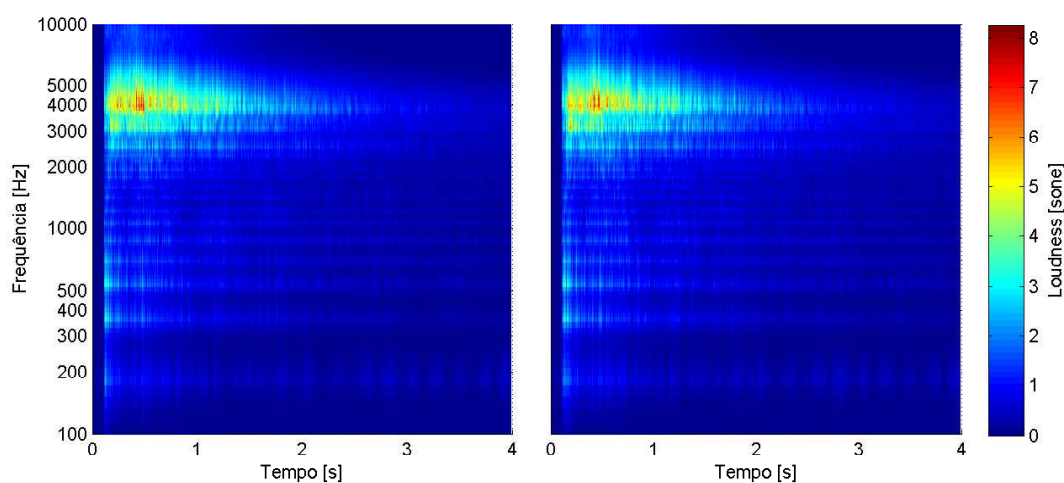


Figura D.16 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 6 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.  
Fonte: Autor

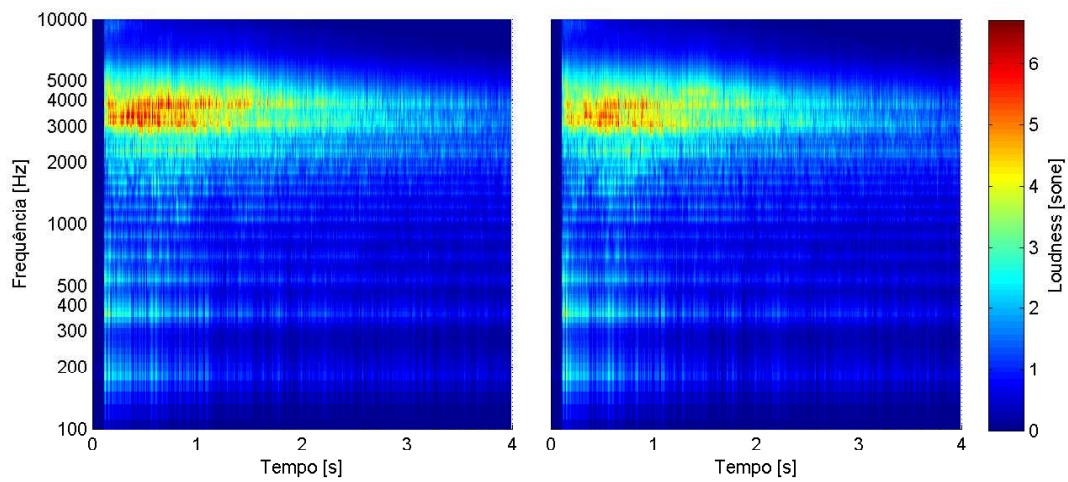


Figura D.17 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 7 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

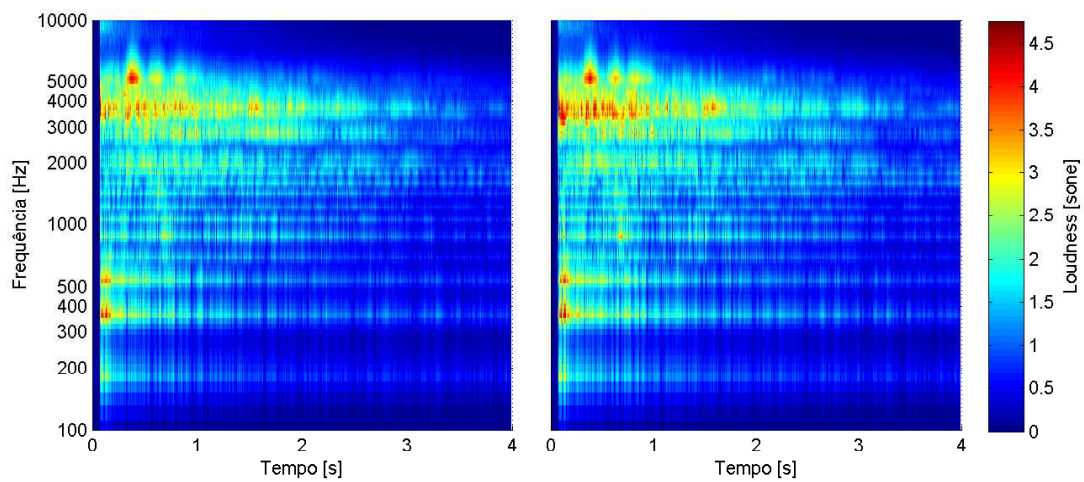


Figura D.18 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 8 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor

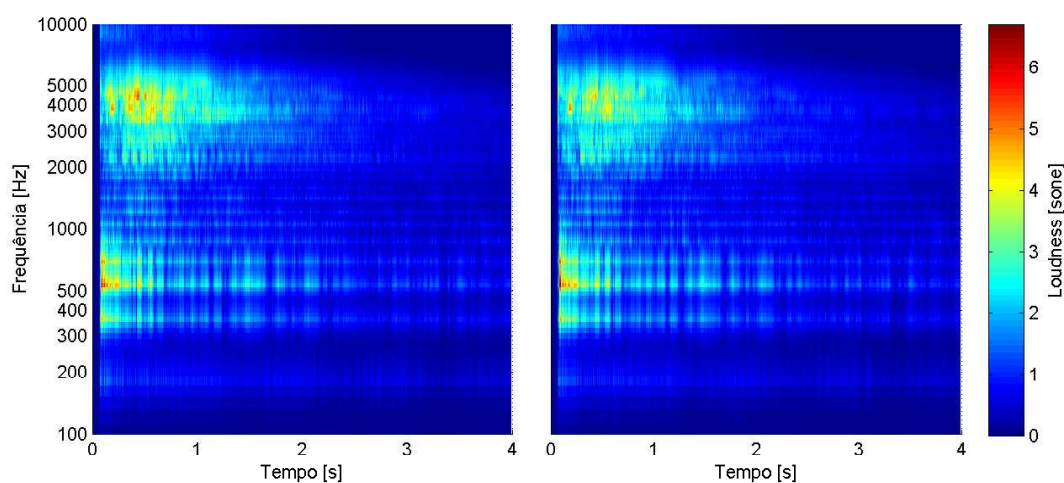


Figura D.19 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 9 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.  
Fonte: Autor

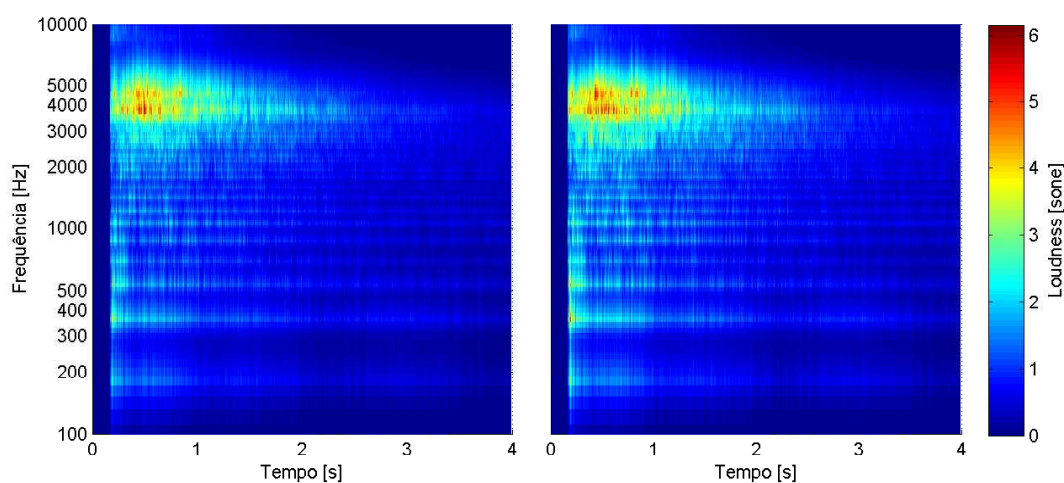


Figura D.20 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 10 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.  
Fonte: Autor

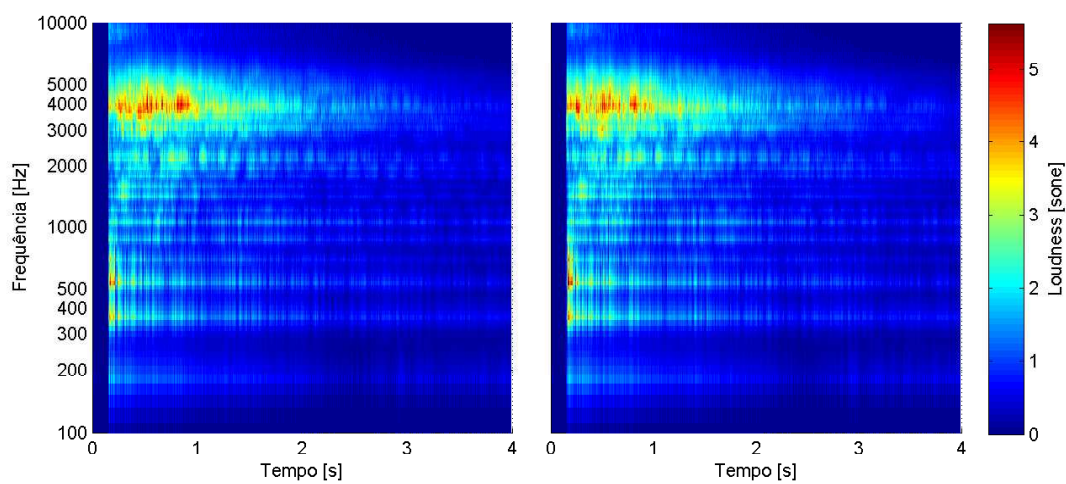


Figura D.21 – Espectrograma de *Loudness* (modelo de Zwicker) para amostra 11 de ataque. Sinais dos canais esquerdo e direito.

Fonte: Autor



## APÊNDICE E – Escalonamento multidimensional (MDS)

No início do trabalho, a análise subjetiva inicial do timbre foi feita através do método de escalonamento multidimensional (MDS). O objetivo seria encontrar um número de dimensões subjetivas para o conceito de timbre, envolvendo pratos de percussão. Os dados de entrada deste método baseiam-se em uma matriz de dissimilaridades, construída através de ensaios subjetivos envolvendo avaliações de diferenças entre estímulos. Obtendo diferenças através do método de comparação pareada entre um grupo de estímulos, pode-se obter dimensões relativas para o conceito sendo julgado.

Nesta etapa foram feitas avaliações de dissimilaridade entre pares de grupos de amostras de condução e ataque. A interface do programa desenvolvido em LabView pode ser vista na Figura E.1, mostrando a escala de resposta de diferença entre timbre de um determinado par de amostras. Foram utilizadas as mesmas amostras obtidas experimentalmente para este trabalho, como também normalizadas em relação ao percentil de 5% do modelo de *Loudness* ( $N_5$ ). Para o grupo de condução foram utilizadas todas as 10 amostras, acarretando em um total de 45 comparações a serem avaliadas. Para o grupo de ataque foram utilizadas apenas 8 amostras (as amostras 3, 7 e 8 não foram utilizadas), gerando um total de 28 comparações. O número total de sujeitos presentes foi de 6 para as avaliações de condução e 8 para as avaliações de ataque, todos músicos bateristas.

Aos extremos da escala de resposta da diferença entre timbre, foram atribuídos os valores de 1 para "Muito semelhantes" e 10 para "Muito diferentes", podem ser vistos na interface utilizada no ensaio e apresentada na Figura E.1. Tais valores se relacionam com a matriz de dissimilaridades, pois tem-se como zero o valor para uma igualdade, ou seja, os valores da diagonal. O valor máximo de dissimilaridade adotado afeta apenas os extremos de cada dimensão relativa obtida. O método de MDS utilizado foi o modelo clássico, disponível para o cálculo através de uma função existente no software MATLAB. Para todos os casos, houve três dimensões principais a serem consideradas. A Figura E.2, Figura E.3 e Figura E.4 mostram os resultados para as amostras de condução, obtidos para cada sujeito participante. A Figura E.5, Figura E.6 e Figura E.7 mostram os resultados para as amostras de ataque, obtidos para cada sujeito participante. Em todos os casos pode-se observar uma enorme variância entre a resposta dos sujeitos, possivelmente devido ao fato de que não exista um significado único

para diferenciar o conceito de timbre em pratos de percussão.



Figura E.1 – Interface do programa em LabView para utilização no teste subjetivo. Fonte: Autor

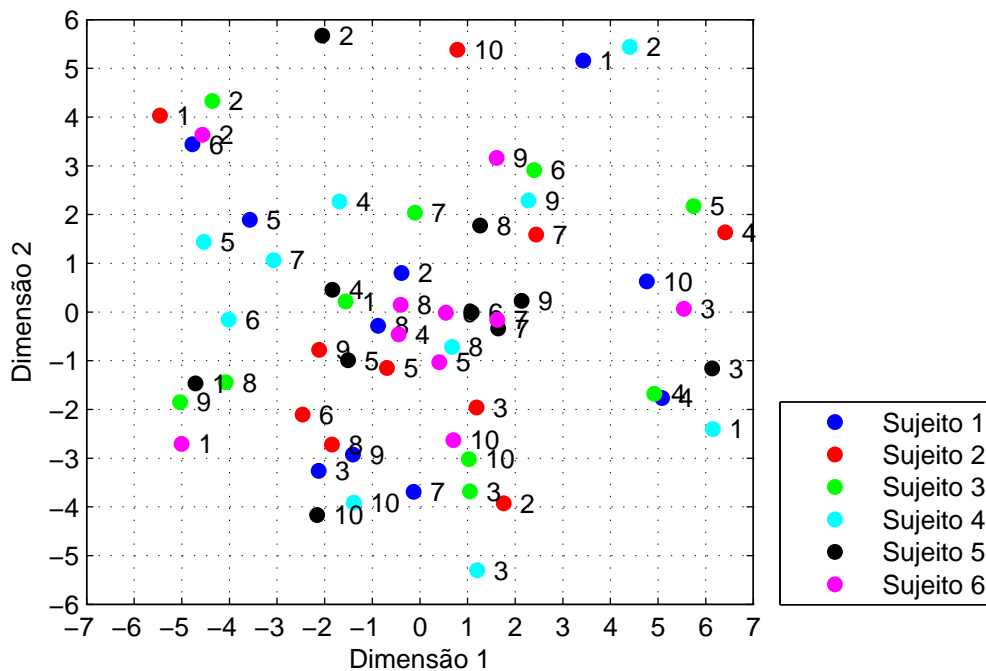


Figura E.2 – Resultado MDS modelo clássico, dimensões 1 e 2, amostras de condução, para cada sujeito. Fonte: Autor

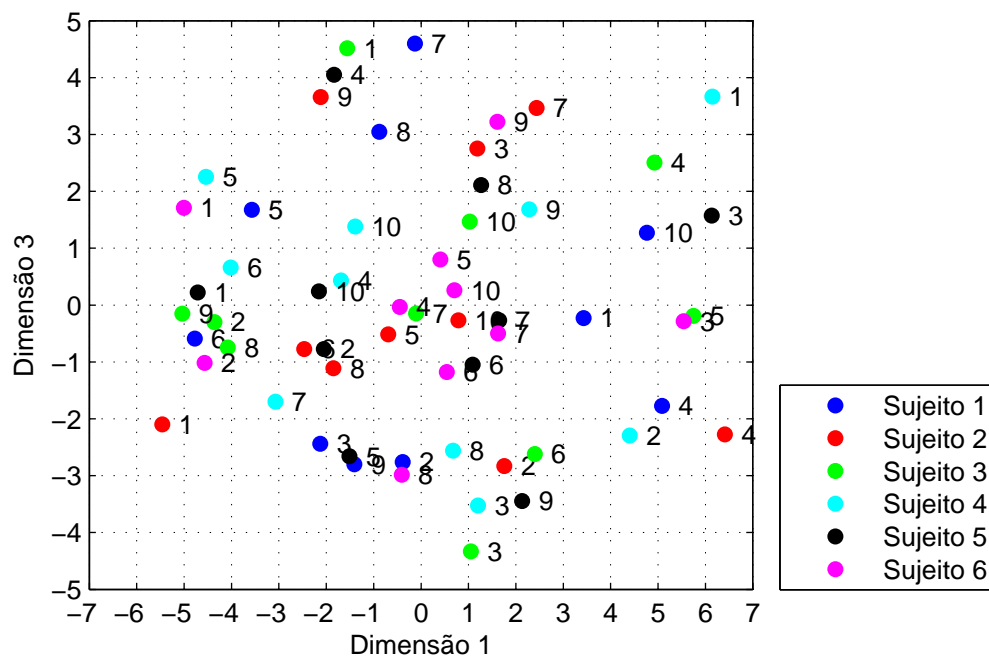


Figura E.3 – Resultado MDS modelo clássico, dimensões 1 e 3, amostras de condução, para cada sujeito. Fonte: Autor

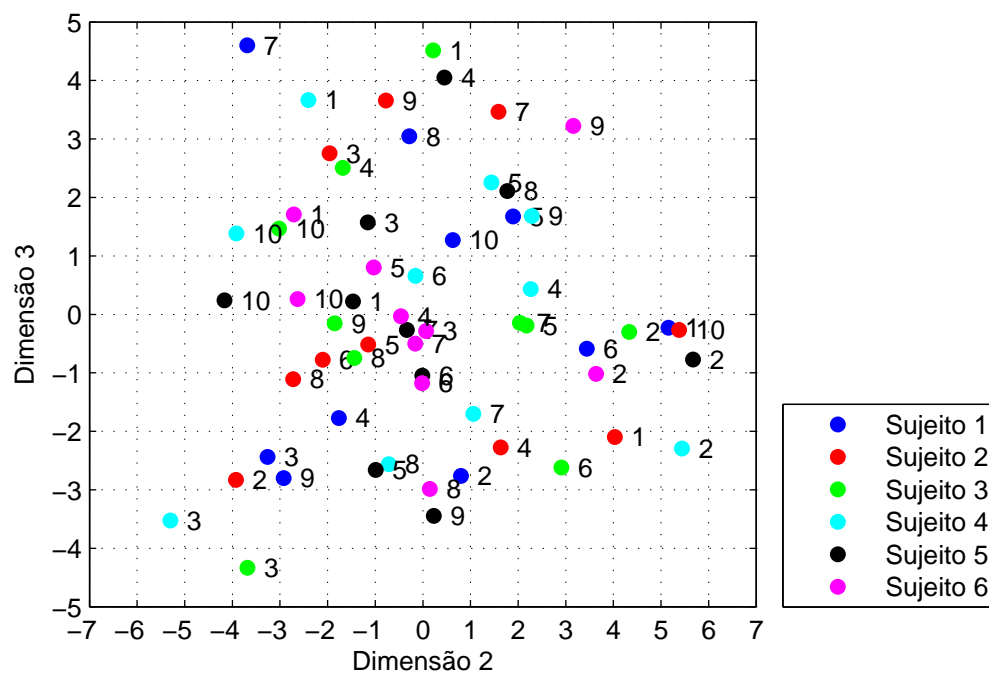


Figura E.4 – Resultado MDS modelo clássico, dimensões 2 e 3, amostras de condução, para cada sujeito. Fonte: Autor

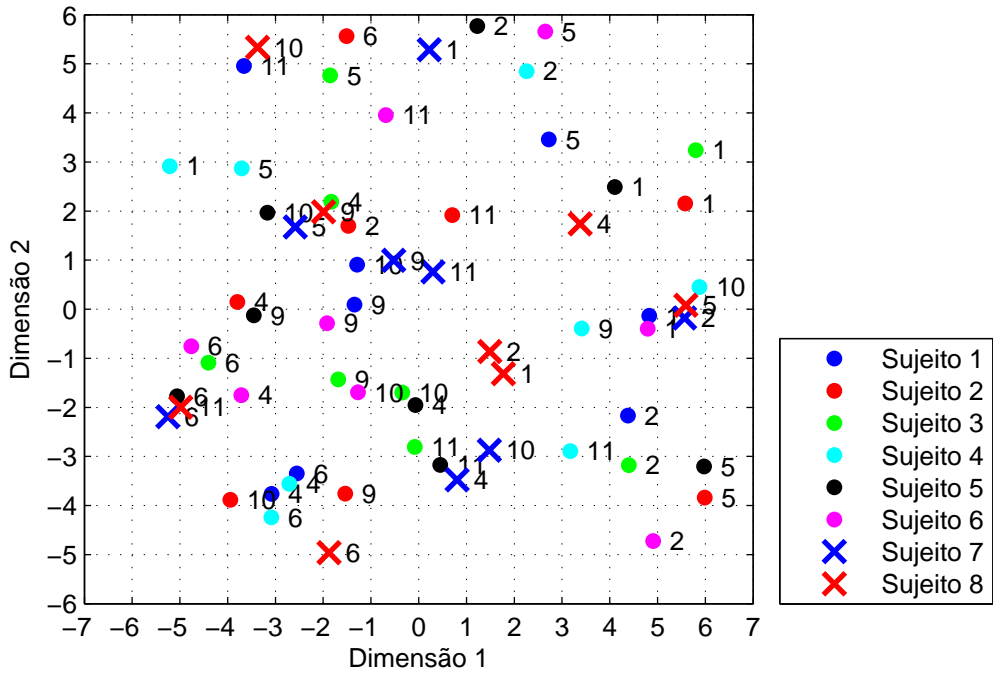


Figura E.5 – Resultado MDS modelo clássico, dimensões 1 e 2, amostras de ataque, para cada sujeito. Fonte: Autor

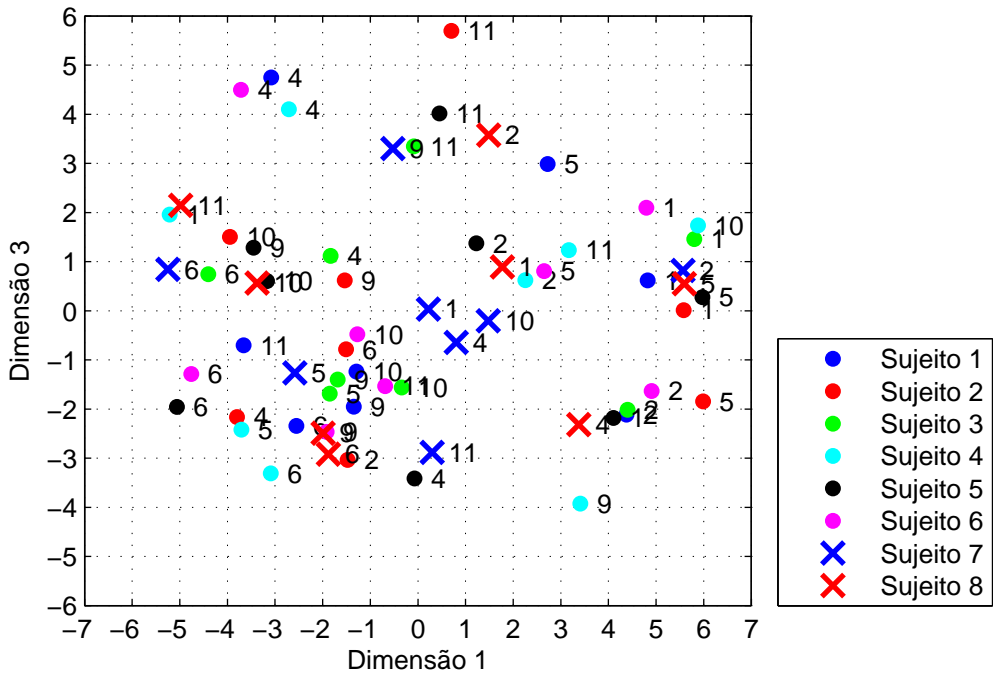


Figura E.6 – Resultado MDS modelo clássico, dimensões 1 e 3, amostras de ataque, para cada sujeito. Fonte: Autor

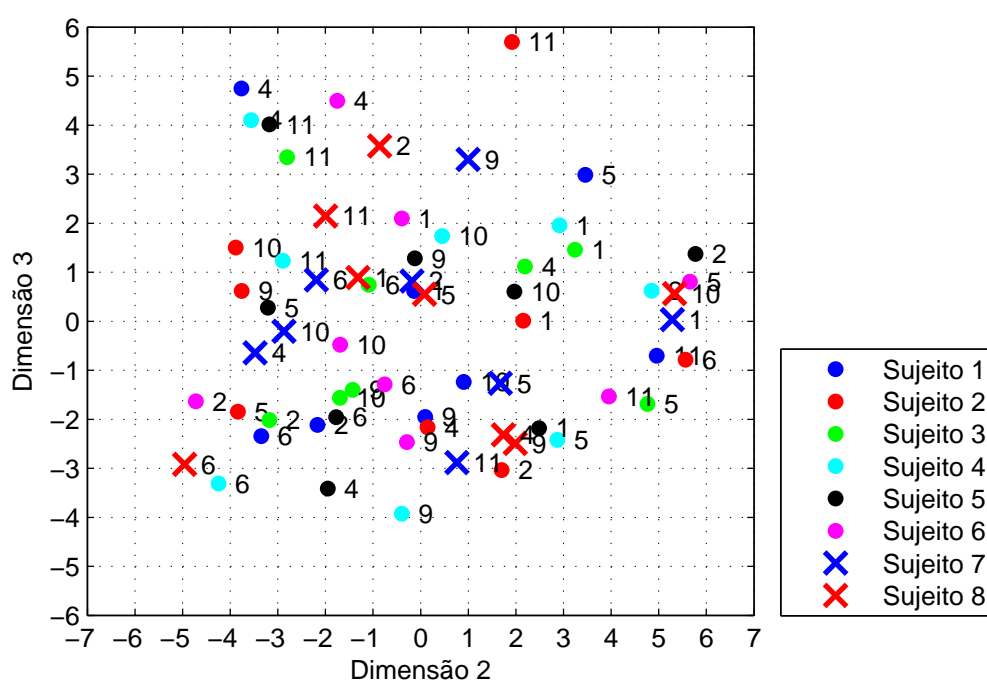


Figura E.7 – Resultado MDS modelo clássico, dimensões 2 e 3, amostras de ataque, para cada sujeito. Fonte: Autor



## APÊNDICE F – Histogramas análise subjetiva

### F.1 Amostras de condução

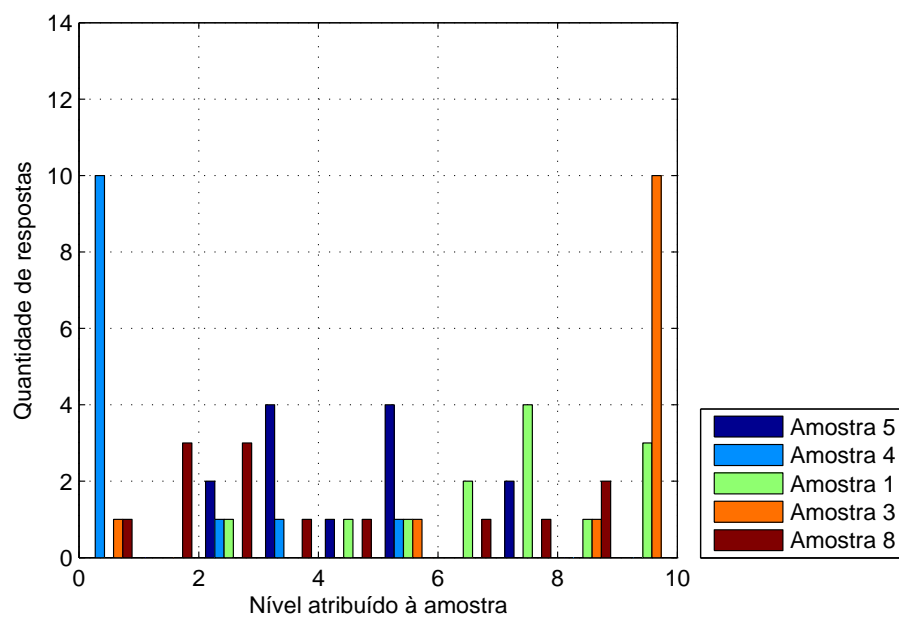


Figura F.1 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 1 da característica *Brilhante*. Fonte: Autor

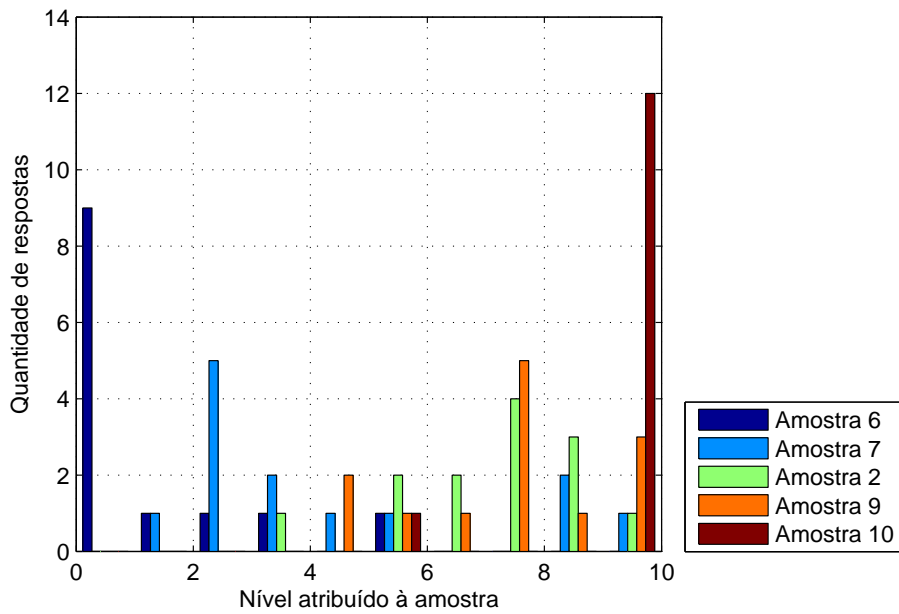


Figura F.2 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 2 da característica *Brilhante*. Fonte: Autor

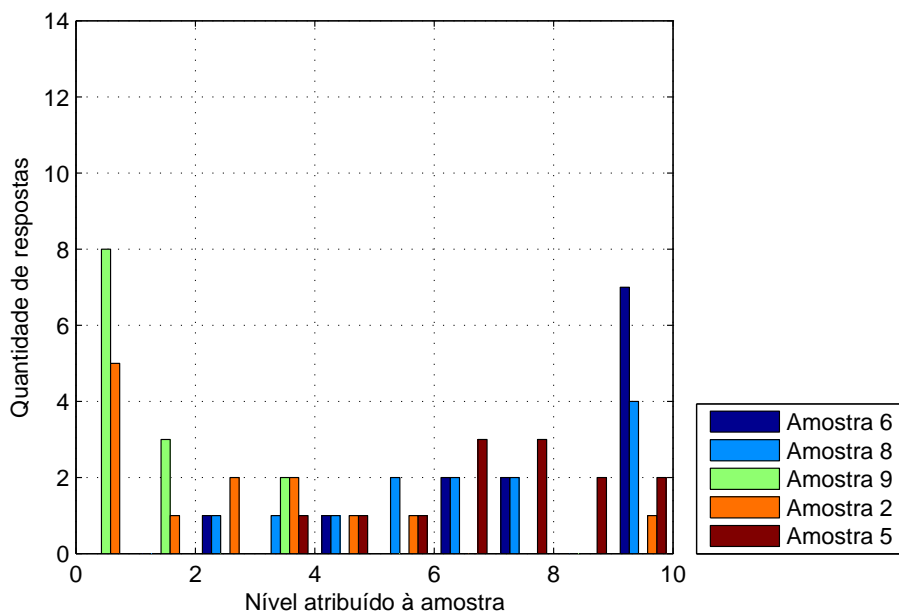


Figura F.3 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 1 da característica *Dark*. Fonte: Autor



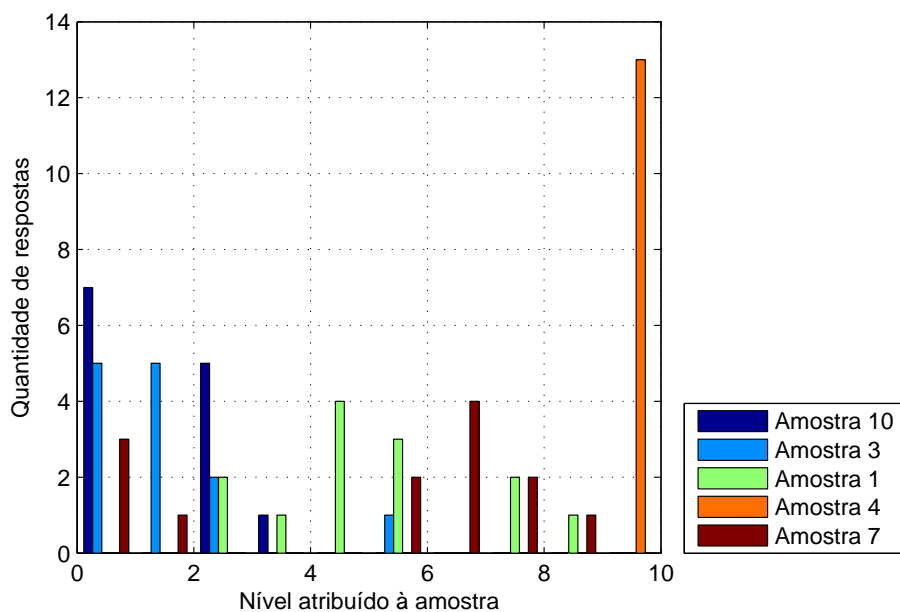


Figura F.4 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 2 da característica *Dark*. Fonte: Autor

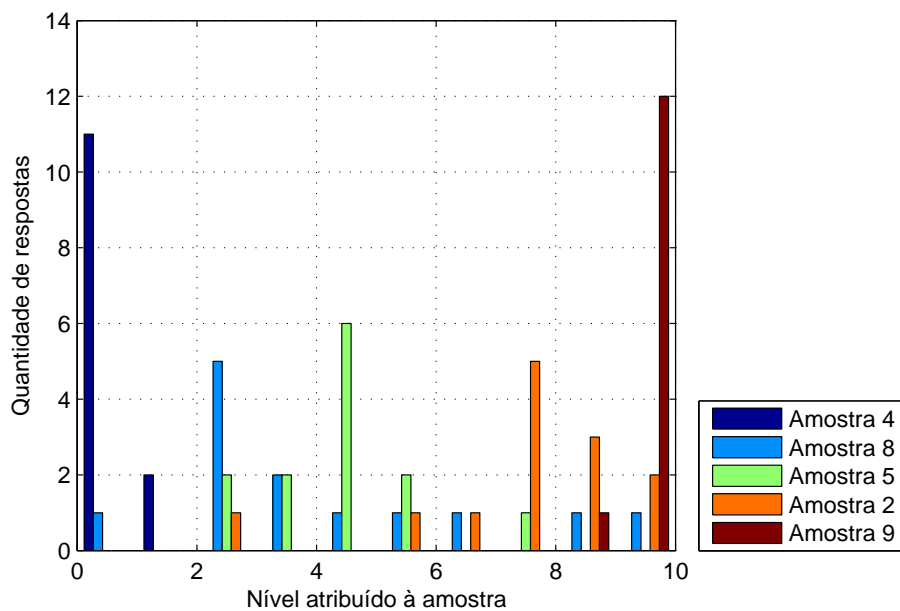


Figura F.5 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 1 da característica *Ping*. Fonte: Autor

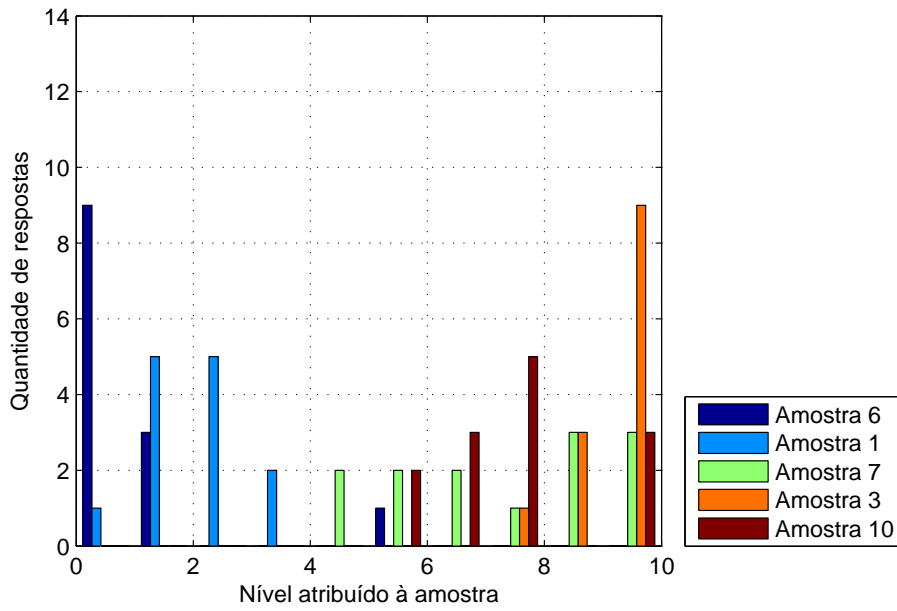


Figura F.6 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 2 da característica *Ping*. Fonte: Autor

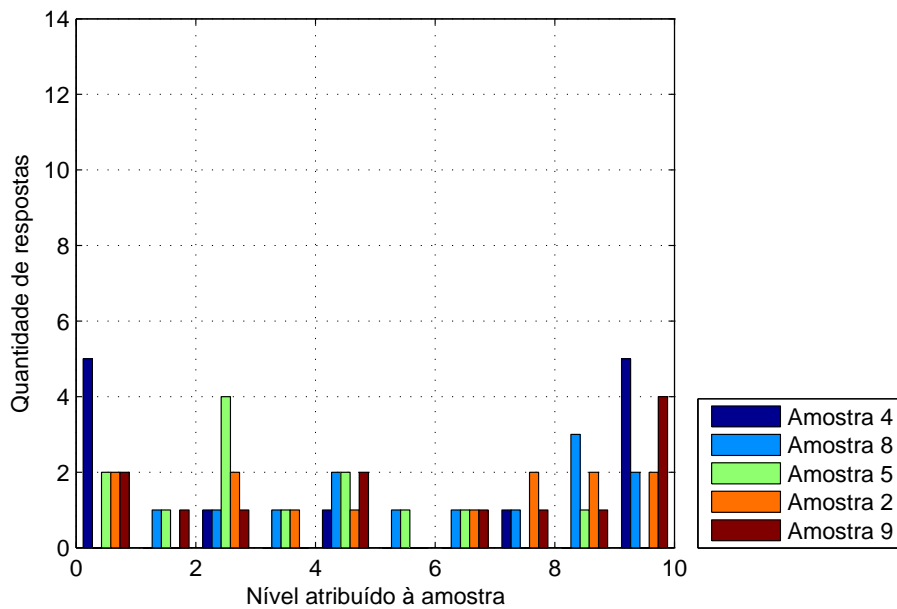


Figura F.7 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 1 da característica *Qualidade*. Fonte: Autor

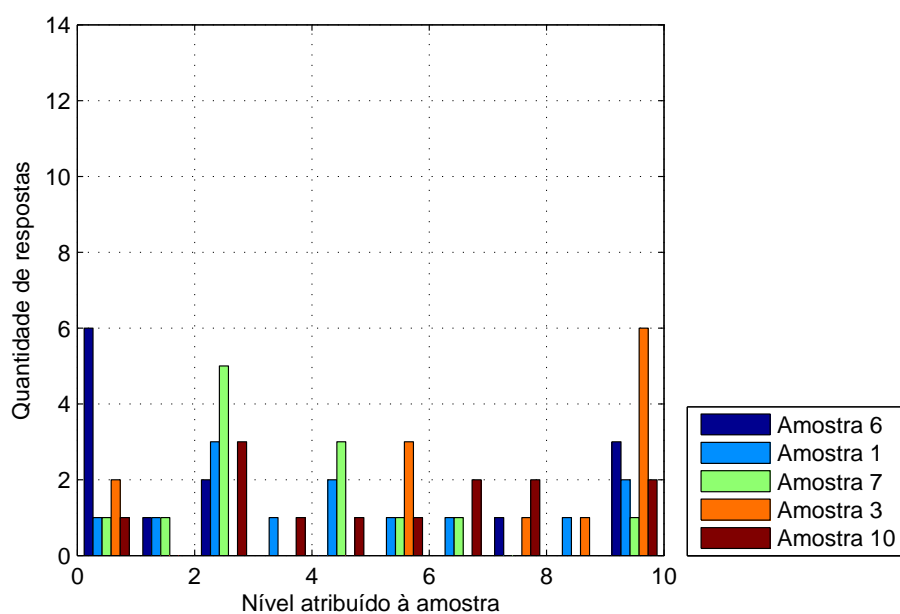


Figura F.8 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de condução para o Grupo 2 da característica *Qualidade*. Fonte: Autor

## F.2 Amostras de ataque

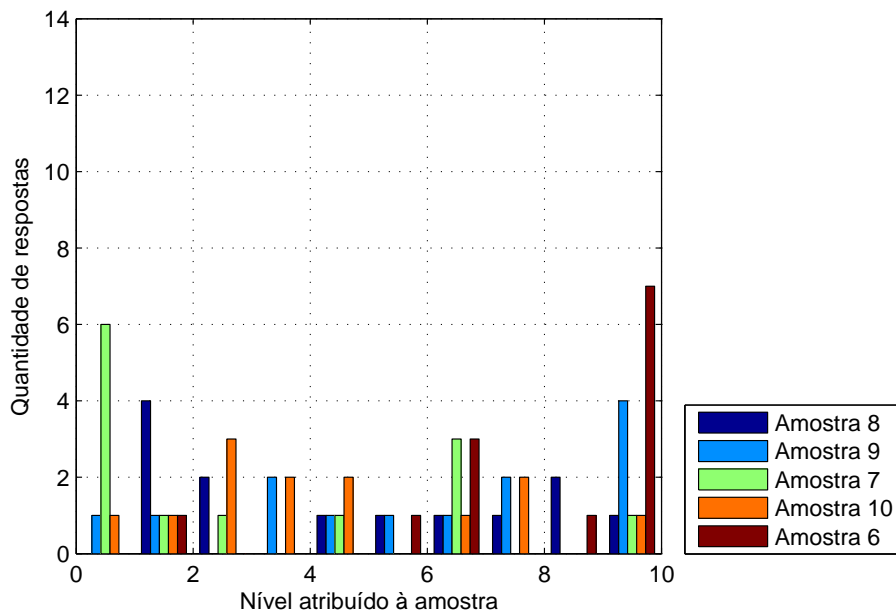


Figura F.9 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 1 da característica *Brilhante*.

Fonte: Autor

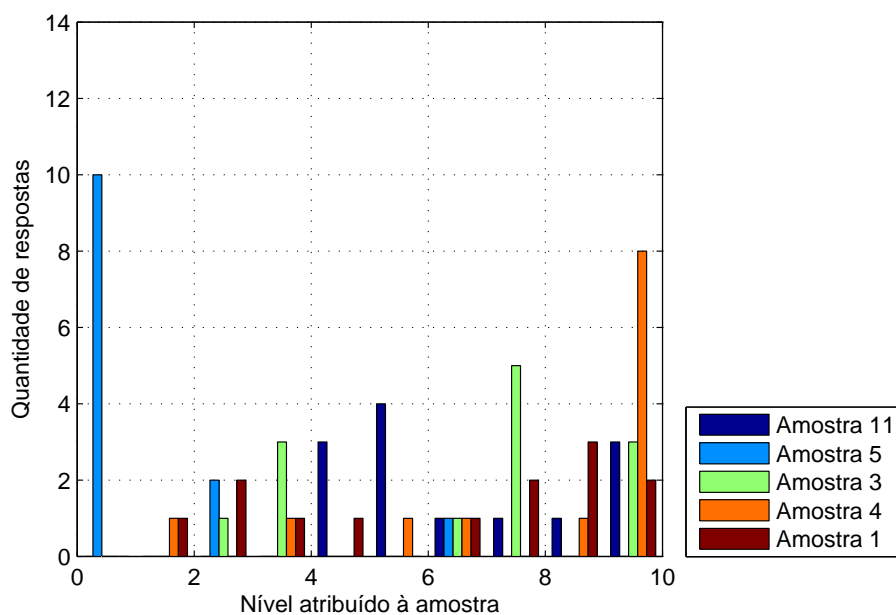


Figura F.10 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 2 da característica *Brilhante*.

Fonte: Autor

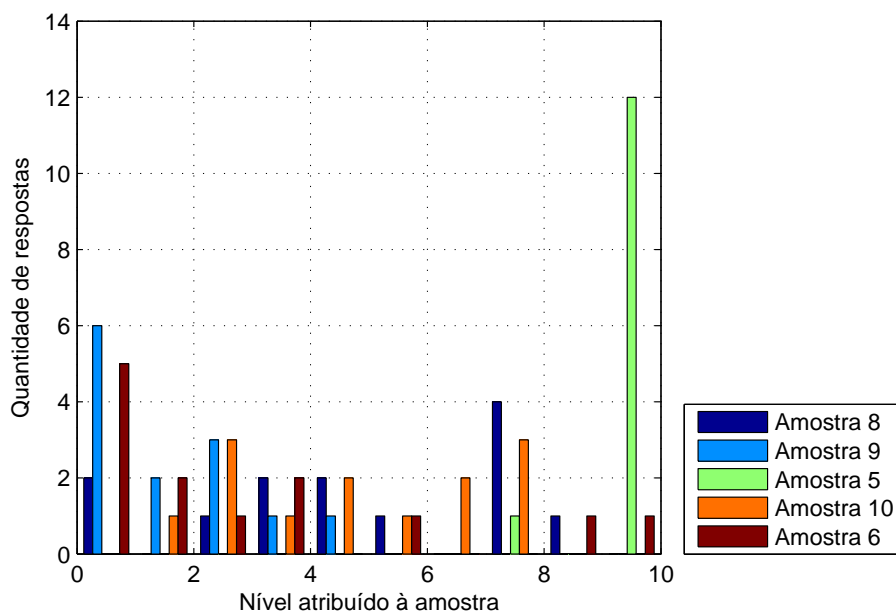


Figura F.11 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 1 da característica *Dark*.

Fonte: Autor

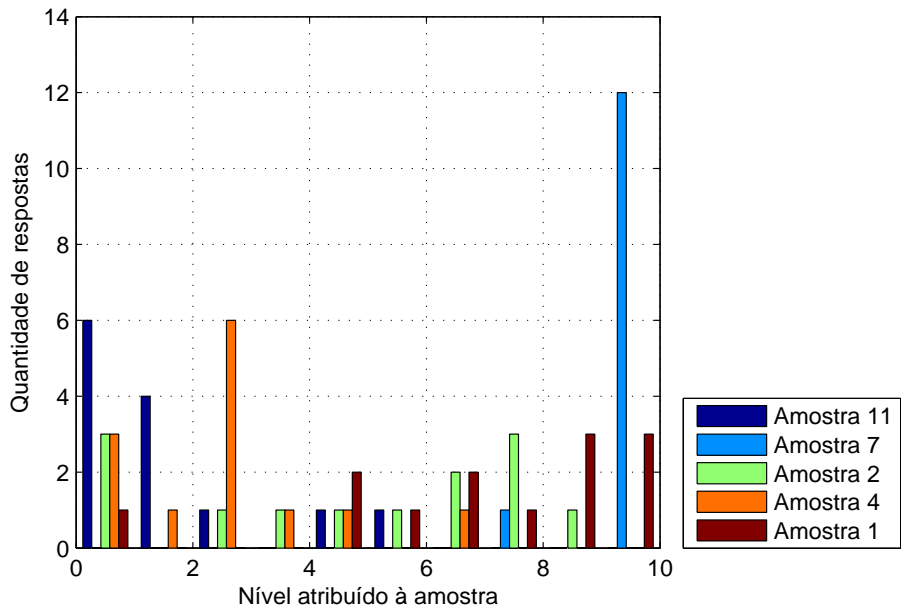


Figura F.12 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 2 da característica *Dark*.  
 Fonte: Autor

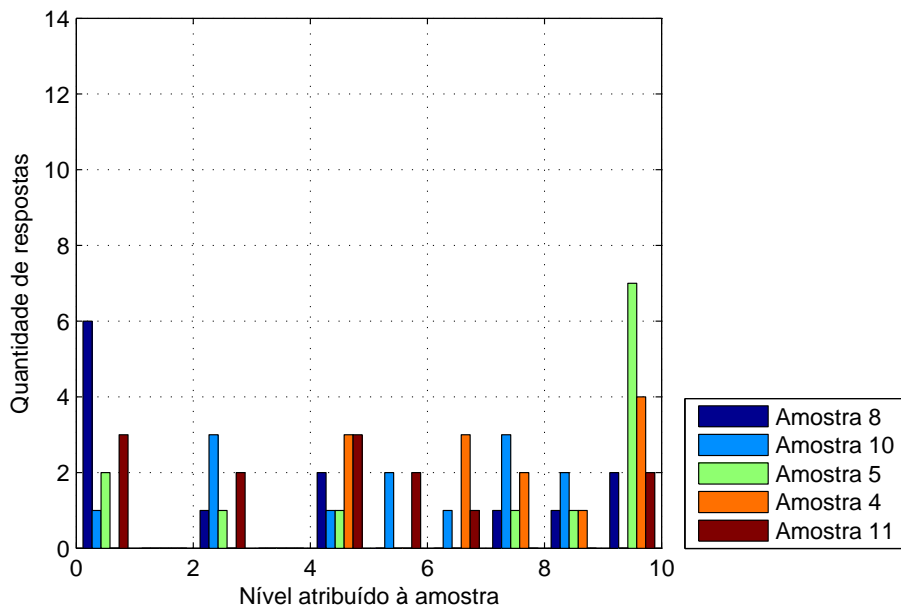


Figura F.13 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 1 da característica *Abertura*.  
 Fonte: Autor

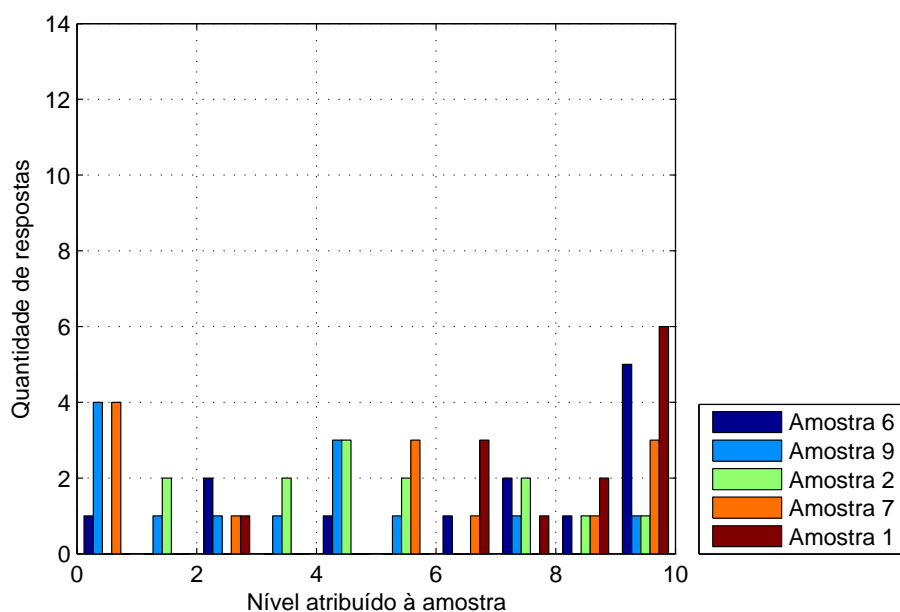


Figura F.14 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 2 da característica *Abertura*.  
Fonte: Autor

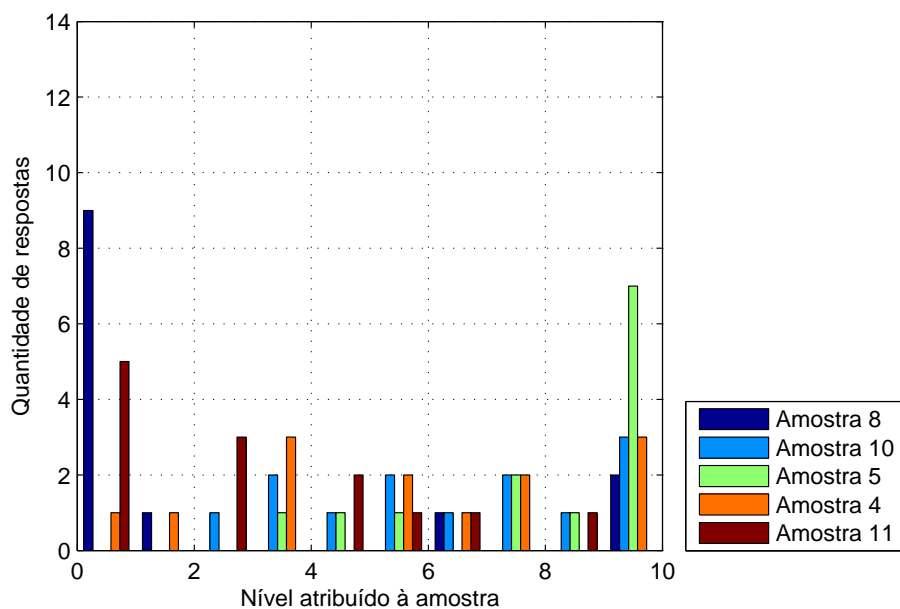


Figura F.15 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 1 da característica *Qualidade*.  
Fonte: Autor

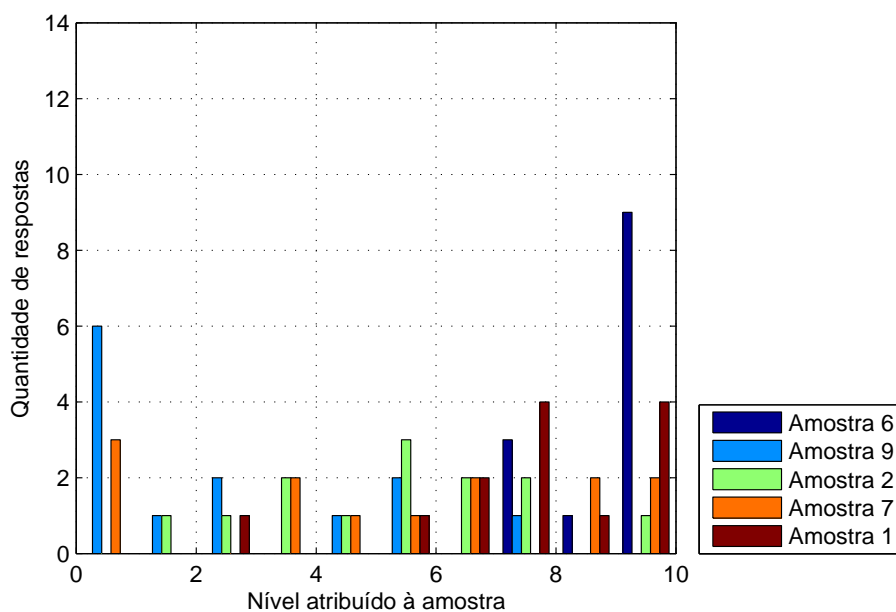


Figura F.16 – Histograma de respostas nas avaliações das amostras de ataque para o Grupo 2 da característica *Qualidade*.  
Fonte: Autor



## APÊNDICE G – Coeficiente de correlação intraclassa (ICC)

O coeficiente de correlação intraclassa (ICC) é utilizado para medir a confiabilidade de um número de avaliações, comparando a variabilidade de classificações (índices quantitativos) de um mesmo sujeito avaliador com a variação total de classificações de todos os julgamentos e sujeitos. Através deste coeficiente pode-se obter uma correlação não apenas entre um par de série de dados, mas entre um grupo de  $n$  séries de dados. Assim, para se medir a confiabilidade, separa-se os dados em: objetos avaliados e múltiplas observações (avaliações). Uma notação geral dos dados utilizados no cálculo do ICC pode ser vista na Figura G.1.

Objeto Avaliado	Múltiplas Observações			
	1	2	... $j$	... $k$
1	$\chi_{11}$	$\chi_{12}$	... $\chi_{1j}$	... $\chi_{1k}$
2	$\chi_{21}$	$\chi_{22}$	... $\chi_{2j}$	... $\chi_{2k}$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$i$	$\chi_{i1}$	$\chi_{i2}$	... $\chi_{ij}$	... $\chi_{ik}$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$n$	$\chi_{n1}$	$\chi_{n2}$	... $\chi_{nj}$	... $\chi_{nk}$

Figura G.1 – Características de um grupo de dados para o cálculo do ICC. Fonte: Adaptado de [59]

Existem algumas diferenças entre modelos de ICC, as quais certas propriedades dos dados analisados são consideradas. O método utilizado neste trabalho, utilizou o conceito de que os objetos e as múltiplas observações (sujeitos avaliadores) foram considerados como aleatórias. Este tipo levou o nome de *Two-way random effects (Case 2)*, o qual considera que as linhas e colunas da tabela mostrada na Figura G.1 possuem uma fonte de variância.

Neste caso existem dois fatores que podem ser avaliados pelo ICC, consistência e concordância entre os dados. Pode-se calcular considerando a variância entre cada observação (tipo utilizado no trabalho),

ou da média entre elas. A consistência desconsidera uma variabilidade direta entre valores das colunas, considerando apenas a variação da correlação entre elas [59]. Para as aplicações deste trabalho, foi efetuado o cálculo da concordância entre as avaliações dos sujeitos participantes, considerando a variabilidade dos índices julgados por cada participante, sendo a mesma dada através da equação:

$$\text{ICC} = \frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k - 1)MS_E + \frac{k}{n}(MS_C - MS_E)}, \quad (\text{G.1})$$

onde  $MS_R$  é a média quadrática das linhas,  $MS_E$  é o erro médio quadrático,  $MS_C$  é a média quadrática das colunas,  $k$  o número total de observações e  $n$  o número total de objetos, todas as variáveis provenientes dos conceitos de ANOVA [59]. As equações a seguir mostram os cálculos de cada uma das médias.

$$MS_R = k \frac{\sum_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}, \quad (\text{G.2})$$

$$MS_C = n \frac{\sum_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{(k - 1)} \quad (\text{G.3})$$

$$MS_E = \frac{\sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \bar{x})^2}{(n - 1)(k - 1)} \quad (\text{G.4})$$

## **ANEXO A – Resultados experimentais sobre acústica de pratos**

Imp	St Pt	Lev	Energy Peaks in Decreasing Order of Intensity																									
			Fund		UL																							
			cps	cps	cps	dB	cps	dB	cps	dB	cps	dB	cps	dB	cps	dB	cps	dB	cps	dB	cps	dB	cps	dB				
Yel	Edge	ff	235	20000+	4100	45	3200	44	2400	45	550	45	740	42	1700	41	6400	40	1100	39	980	39	7200	38	310	33	235	25
		mf	235	9500	550	42	5200	39	740	38	1650	37	1120	36	2350	35	4200	35	510	24	235	19						
		pp	235	5600	560	38	730	34	1100	27	1650	22	410	19	310	15	2450	15	235	12	3100	8						
	Cup	ff	440	20000+	4000	46	720	44	3150	45	600	45	2350	41	1800	40	7000	39	1050	37	1160	37	440	35				
		mf	370	10000	560	42	720	39	1600	37	2350	34	3150	33	4200	32	1240	32	370	24	7200	15						
		pp	340	2300	410	38	750	27	340	26	1220	20	1900	12														
Red	Edge	ff	235	20000+	3200	45	4100	42	560	42	730	41	1700	40	2350	40	6400	36	1100	36	410	29	410	29	310	21	235	12
		mf	235	10000	560	41	740	38	420	37	2350	37	3200	26	1700	35	1100	34	980	33	310	25	235	14				
		pp	235	6000	560	40	740	36	1700	30	1020	27	2400	26	3200	24	410	23	4100	20	310	17	235	12				
	Cup	ff	360	20000+	4100	45	3200	44	560	45	2350	42	740	42	1700	41	1010	39	7200	36	410	35	560	22				
		mf	420	10000	570	41	3200	40	800	39	1750	38	4200	37	2400	36	420	35	1200	33	1000	32						
		pp	410	5500	540	34	740	32	410	28	970	27	1700	27	1090	26	2300	22	3200	19	4100	14						
Cord	Edge	ff	235	20000+	4100	44	3200	45	560	42	750	41	1650	41	2350	40	1100	39	310	29	235	22	235	13				
		mf	235	12000	560	41	740	38	3200	37	2350	36	4100	36	1700	35	1100	33	410	28	310	26	235	13				
		pp	235	6000	600	39	750	35	1550	32	1000	26	2500	26	3200	23	425	20	4250	16	320	12	235	10				
	Cup	ff	410	20000+	3200	42	4100	41	740	41	1700	39	2450	38	6400	36	1020	36	1110	36	410	30						
		mf	410	10000	3200	40	740	38	2250	37	1650	36	560	36	4100	35	1100	34	410	33	7000	20						
		pp	410	6300	560	35	970	32	750	32	1700	30	2350	27	3200	27	410	27	4100	21								

Figura A.1 – Resultados do experimento para o Prato *Zaldjian Old K*. Harmônicos separados por tipo de ponteira, local e intensidade de impacto, ordenados por amplitude do pico. Fonte: [72].

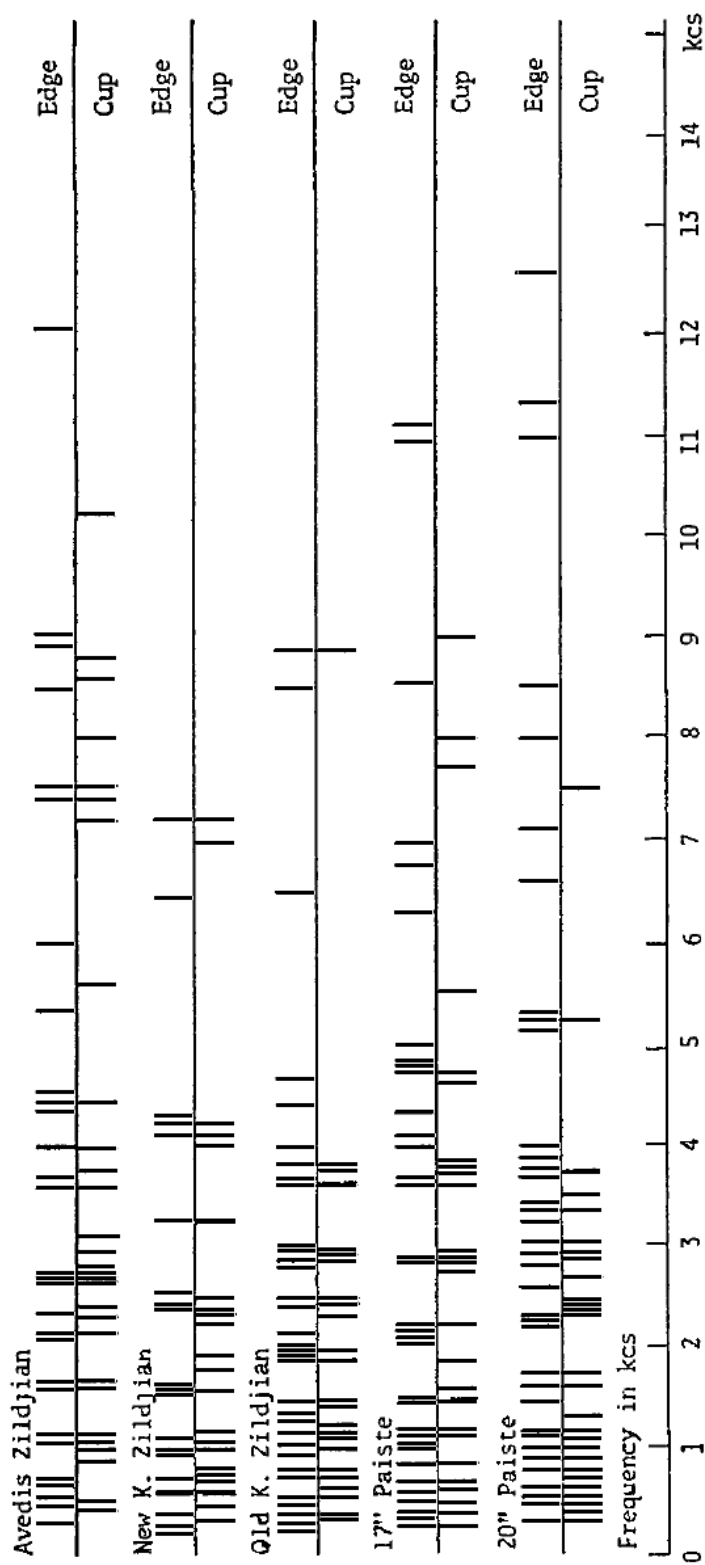


Figura A.2 – Resultados dos picos de frequência do espectro sonoro após o impacto em dois pontos da superfície, para os diferentes modelos analisados. *Edge*: extremidade; *Cup*: cúpula. Fonte: [72].



## ANEXO B – Glossário semântico para pratos de percussão

Tabela B.1 – Glossário de termos referentes ao som de pratos de percussão, apresentado pela empresa fabricante *Zildjian*. Fonte: [63], traduzido pelo autor.

<b>Termo</b>	<b>Significado</b>
<i>Agressive</i>	Agressivo, marcante, com muito volume, explosivo.
<i>Atmospheric</i>	Atmosférico, refere-se à sonoridade envolvente do prato, somando-se à música.
<i>Bright</i>	Brilho, refere-se ao prato com sonoridade brilhante.
<i>Clean</i>	Limpo, muito definido.
<i>Complex</i>	Complexo, refere-se à sonoridade com muitos detalhes.
<i>Dark</i>	Refere-se à sonoridade mais "escura", tonalidade médio-grave e grave.
<i>Decay</i>	Finalização do som, do ataque até o som desaparecer.
<i>Deep</i>	Profundo, refere-se à sonoridade profunda e definida do prato (geralmente condução)
<i>Dry</i>	Seco, sonoridade seca com ataque curto ou ping muito seco.
<i>Expressive</i>	Expressivo, sonoridade muito musical com uma identidade própria.
<i>Fast</i>	Rápido, prato de ataque com resposta rápida.
<i>Full-bodied</i>	Refere-se ao corpo sonoro, sonoridade encorpada, marcante, forte.
<i>Heavy</i>	Pesado, pratos grossos, pesados com muito volume e alta durabilidade.
<i>Loud</i>	Alto, volume do prato.
<i>Melodic</i>	Melódico, prato muito musical, que soa melódico ou agradável.
<i>Ping</i>	Refere-se à sonoridade proporcionada pela ponta da baqueta em contato com o prato de condução.
<i>Powerfull</i>	Poderoso, refere-se ao prato com sonoridade muito forte.
<i>Raw</i>	Crú, refere-se à sonoridade crua (seca/limpa).
<i>Warm</i>	Refere-se à sonoridade quente, musical, com muita expressão.

Tabela B.2 – Glossário de termos referentes ao som de pratos de percussão, apresentado pela empresa fabricante *Sabian*. Fonte: [62], traduzido pelo autor.

<b>Termo</b>	<b>Significado</b>
<i>Attack</i>	Ataque, taxa de resposta de um prato, alguns possuem uma resposta (ataque) mais rápida.
<i>Bright</i>	Brilho, sons que possuem tons em altas frequências.
<i>Cut</i>	Habilidade do som em penetrar na música ambiente.
<i>Dark</i>	Sons de de baixa frequência, tons mornos que compõem uma resposta "escura".
<i>Dry</i>	Baixa quantidade de tons que influencia em um impacto mais evidente.
<i>Fast</i>	Som com ataque e decaimento rápido.
<i>Fundamental</i>	O tom predominante na resposta do prato.
<i>Glassy</i>	Resposta sonora clara e cintilante, suave como vidro.
<i>Hot</i>	Uma mistura de <i>Dark</i> , com uma grande variabilidade de tons, um som que queima.
<i>Partials</i>	Uma série de tons produzida juntamente com a fundamental.
<i>Sustain</i>	A duração do som antes do decaimento.
<i>Timbre</i>	As características gerais do som de um prato.
<i>Trashy</i>	Crú e sujo, geralmente associado com pratos do tipo China.
<i>Warm</i>	Uma resposta mais suave composta pela mistura de tons graves com sons musicais.



## ANEXO C – Códigos em MATLAB

### C.1 Loudness DIN45631

```

% Program to calculate loudness based on DIN 45631
% Based on BASIC Program Published in
% J. Acoust. Soc. Jpn (E) 12, 1 (1991)
% by E. Zwicker, H. Fastl, U. Widmann, K. Kurakata,
% S. Kuwano, and S. Namba
%
% "Re-Author":    Aaron Hastings, Herrick Labs, Purdue
% University
% Date Started: 29 October 00
% Last Modified: 31 October 00
% Status: Program Correctly Calculates Loudness for a 70
% dB 1000 Hz sine filtered using 1/3 octave band filters
%
% Syntax:
% [N, Ns, err]=DIN45631(LT, MS)
%
% This is a loudness function which:
%   Calculates loudness based on DIN 45631 / ISO 532 B
%   (Zwicker)
%   Accepts 1/3 octave band levels (SPL Linear
%   Weighting)
%   * This data must be calibrated using a separate
%   calibration function
%
% Input Variables
% LT(28)           Field of 28 elements which represent
%                  the 1/3 OB levels in dB with fc = 25 Hz
%                  to 12.5 kHz
% MS              String variable to distinguish the type
%                  of sound field ( free / diffues )
%
% Output Variables
% N               Loudness in sone G
% NS              Specific Loudness
% err             Error Code
%
% Working Variables
% FR(28)          Center frequencies of 1/3 OB
% RAP(8)          Ranges of 1/3 OB levels for correction
%                  at low frequencies
%                  according to equal loudness contours
% DLL(11,8)       Reduction of 1/3 OB levels at low
%                  frequencies according to equal loudness

```

```

%           contours within the 8 ranges defined
%           by RAP
%   LTQ(20)   Critical Band Rate level at absolute
%           threshold without taking into account
%           the transmission characteristics of
%           the ear
%   AO(20)    Correction of levels according to the
%           transmission characteristics of the ear
%   DDF(20)   Level difference between free and
%           diffuse sound fields
%   DCB(20)   Adaptation of 1/3 OB levels to the
%           corresponding critical band level
%   ZUP(21)   Upper limits of approximated critical
%           bands in terms of critical band rate
%   RNS(18)   Range of specific loudness for the
%           determination of the steepness of the
%           upper slopes in the specific loudness
%           critical band rate pattern
%   USL(18,8) Steepness of the upper slopes in the
%           specific loudness - critical band rate
%           pattern for the ranges RNS as a function
%           of the number of the critical band
%
%   Working Variables (Uncertain of Definitions)
%   XP           Equal Loudness Contours
%   TI           Intensity of LT
%   LCB          Lower Critical Band
%   LE           Level Excitation
%   NM           Critical Band Level
%   KORRY        Correction Factor
%   N            Loudness (in sones)
%   DZ           Separation in CBR
%   N2           Main Loudness
%   Z1           Critical Band Rate for Lower Limit
%   N1           Loudness of previous band
%   IZ           Center "Frequency" Counter, with NS
%   Z            Critical band rate
%   J,IG         Counters used with USL

```

```
function [N, NS, err]=DIN45631(LT, MS)
```

```
%% Begin initializing the working variables
```

```
FR=[25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 ...
    630 800 1.0 1.25 1.6 2.0 2.5 3.15 4.0 5.0 6.3 8.0...
    10.0 12.5];
```

```
RAP=[45 55 65 71 80 90 100 120];
```

```
DLL=[-32 -24 -16 -10 -5 0 -7 -3 0 -2 0
    -29 -22 -15 -10 -4 0 -7 -2 0 -2 0
    -27 -19 -14 -9 -4 0 -6 -2 0 -2 0
```

```

-25 -17 -12 -9 -3 0 -5 -2 0 -2 0
-23 -16 -11 -7 -3 0 -4 -1 0 -1 0
-20 -14 -10 -6 -3 0 -4 -1 0 -1 0
-18 -12 -9 -6 -2 0 -3 -1 0 -1 0
-15 -10 -8 -4 -2 0 -3 -1 0 -1 0]'; % BASIC code does
% this a oddly,
% hence the
% transpose
LTQ=[30 18 12 8 7 6 5 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3];
AO=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -0.5 -1.6 -3.2 -5.4 -5.6 -4.0...
-1.5 2.0 5.0 12.0];
DDF=[0 0 0.5 0.9 1.2 1.6 2.3 2.8 3.0 2.0 0.0 -1.4...
-2.0 -1.9 -1.0 0.5 3.0 4.0 4.3 4.0];
DCB=[-0.25 -0.6 -0.8 -0.8 -0.5 0.0 0.5 1.1 1.5 1.7 ...
1.8 1.8 1.7 1.6 1.4 1.2 0.8 0.5 0.0 -0.5];
ZUP=[0.9 1.8 2.8 3.5 4.4 5.4 6.6 7.9 9.2 10.6 12.3 ...
13.8 15.2 16.7 18.1 19.3 20.6 21.8 22.7 23.6 24.0];
RNS=[21.5 18.0 15.1 11.5 9.0 6.1 4.4 3.1 2.13 1.36 ...
0.82 0.42 0.30 0.22 0.15 0.10 0.035 0.0];
USL=[13.00 8.20 6.30 5.50 5.50 5.50 5.50 5.50
9.00 7.50 6.00 5.10 4.50 4.50 4.50 4.50
7.80 6.70 5.60 4.90 4.40 3.90 3.90 3.90
6.20 5.40 4.60 4.00 3.50 3.20 3.20 3.20
4.50 3.80 3.60 3.20 2.90 2.70 2.70 2.70
3.70 3.00 2.80 2.35 2.20 2.20 2.20 2.20
2.90 2.30 2.10 1.90 1.80 1.70 1.70 1.70
2.40 1.70 1.50 1.35 1.30 1.30 1.30 1.30
1.95 1.45 1.30 1.15 1.10 1.10 1.10 1.10
1.50 1.20 0.94 0.86 0.82 0.82 0.82 0.82
0.72 0.67 0.64 0.63 0.62 0.62 0.62 0.62
0.59 0.53 0.51 0.50 0.42 0.42 0.42 0.42
0.40 0.33 0.26 0.24 0.22 0.22 0.22 0.22
0.27 0.21 0.20 0.18 0.17 0.17 0.17 0.17
0.16 0.15 0.14 0.12 0.11 0.11 0.11 0.11
0.12 0.11 0.10 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08
0.09 0.08 0.07 0.06 0.06 0.06 0.06 0.05
0.06 0.05 0.03 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02];

%% Begin Loudness Calculation

%% Correction of 1/3 OB levels according to equal loudness
%% contours (XP) and calculation of the intensities for
%% 1/3 OB's up to 315 Hz

for I=1:11
    J=1;

```

```

while J<8
  if LT(I)<=RAP(J)-DLL(I,J)
    XP=LT(I)+DLL(I,J);
    TI(I)=10^(0.1*XP);
    J=9;    %% To exit from the while loop
  else
    J=J+1;
  end
end
end

%% Determination of Levels LCB(1), LCB(2), and LCB(3)
%% within the first three critical bands

GI(1)=TI(1)+TI(2)+TI(3)+TI(4)+TI(5)+TI(6);
GI(2)=TI(7)+TI(8)+TI(9);
GI(3)=TI(10)+TI(11);

for I=1:3
  if GI(I)>0
    LCB(I)=10*log10(GI(I));
    %% Note: The BASIC code uses a divide by "log(10)"
    %% to gauruntee that the log is base 10
  end
end

%% Calculation of Main Loudness

for I=1:20
  LE(I)=LT(I+8);
  if I<+3
    LE(I)=LCB(I);
  end
  LE(I)=LE(I)-AO(I);
  NM(I)=0;
  if MS=='d' | MS=='D'
    LE(I)=LE(I)+DDF(I);
  end
  if LE(I)>LTQ(I)
    LE(I)=LE(I)-DCB(I);
    S=0.25;
    MP1=0.0635*10^(0.025*LTQ(I));
    MP2=(1-S+S*10^(0.1*(LE(I)-LTQ(I))))^0.25-1;
    NM(I)=MP1*MP2;
    if NM(I)<=0
      NM(I)=0;
    end
  end
end
end

NM(21)=0;

```

```

%% Correction of specific loudness in the lowest critical
%% band taking into account the dependence of absolute
%% threshold within this critical band

KORRY=0.4+0.32*NM(1)^0.2;
if KORRY>1
    KORRY=1;
end
NM(1)=NM(1)*KORRY;

%% Start Values

N=0;
Z1=0;
N1=0;
IZ=1;
Z=0.1;
short=0;

%% Step to first and subsequent critical bands

for I=1:21
    ZUP(I)=ZUP(I)+0.0001;
    IG=I-1;
    if IG>8
        IG=8;
    end
    while Z1<ZUP(I) % Note, Z1 will always be < ZUP(I) when
                    % line is first reached for each I
        if N1>NM(I)
            %% Decide whether the critical band in question is
            %% completely or partly masked by accessory loudness
            N2=RNS(J);
            if N2<NM(I)
                N2=NM(I);
            end
            DZ=(N1-N2)/USL(J,IG);
            Z2=Z1+DZ;
            if Z2>ZUP(I)
                Z2=ZUP(I);
                DZ=Z2-Z1;
                N2=N1-DZ*USL(J,IG);
            end
            %% Contribution of accessory loudness to total
            N=N+DZ*(N1+N2)/2;
            while Z<Z2
                NS(IZ)=N1-(Z-Z1)*USL(J,IG);
                IZ=IZ+1;
                Z=Z+0.1;
            end
        elseif N1==NM(I)
            %% Contribution of unmasked main loudness to total

```

```

%% loudness and calculation of values NS(IZ)
%% with a spacing of Z=IZ*0.1 Bark

Z2=ZUP(I);
N2=NM(I);
N=N+N2*(Z2-Z1);
while Z<Z2
    NS(IZ)=N2;
    IZ=IZ+1;
    Z=Z+0.1;
end
else
%% Determination of the number J corresponding to
%% the range of specific loudness
for J=1:18
    if RNS(J)<NM(I)
        break
    end
end
%% Contribution of unmasked main loudness to total
%% loudness and calculation of values NS(IZ) with
%% a spacing of Z=IZ*0.1 Bark

Z2=ZUP(I);
N2=NM(I);
N=N+N2*(Z2-Z1);
while Z<Z2
    NS(IZ)=N2;
    IZ=IZ+1;
    Z=Z+0.1;
end
end
%% Step to next segment
while J<18
    if N2<=RNS(J)
        J=J+1;
    else
        break
    end
end
if N2<=RNS(J) & J>=18
    J=18;
end
Z1=Z2;
N1=N2;
end
end
%% Now apply some sort of correction

if N<0
    N=0;
elseif N<=16

```

```

    N=floor(N*1000+0.5)/1000;
else
    N=floor(N*100+0.5)/100;
end

err=0;

```

## C.2 Coeficiente de correlação intraclasse

```

function [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC(M, type, alpha, r0)
% Intraclass correlation
% [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC(M, type, alpha, r0)
%
% M is matrix of observations. Each row is an object of
% measurement and each column is a judge or measurement.
%
% 'type' is a string that can be one of the six possible
% codes for the desired type of ICC:
%   '1-1': The degree of absolute agreement among
%           measurements made on randomly selected objects.
%           It estimates the correlation of any two measurements.
%   '1-k': The degree of absolute agreement of measurements
%           that are averages of k independent measurements on
%           randomly selected objects.
%   'C-1': case 2: The degree of consistency among
%           measurements. Also known as norm-referenced
%           reliability and as Winer's adjustment for anchor
%           points. case 3: The degree of consistency among
%           measurements made under the fixed levels of the
%           column factor. This ICC estimates the correlation
%           of any two measurements, but when interaction is
%           present, it underestimates reliability.
%   'C-k': case 2: The degree of consistency for
%           measurements that are averages of k independent
%           measurements on randomly selected objects. Known
%           as Cronbach's alpha in psychometrics. case 3: The
%           degree of consistency for averages of k independent
%           measures made under the fixed levels of column
%           factor.
%   'A-1': case 2: The degree of absolute agreement among
%           measurements. Also known as criterion-referenced
%           reliability. case 3: The absolute agreement of
%           measurements made under the fixed levels of the
%           column factor.
%   'A-k': case 2: The degree of absolute agreement for
%           measurements that are averages of k independent
%           measurements on randomly selected objects. case 3:
%           the degree of absolute agreement for measurements
%           that are based on k independent measurements made

```

```

%           under the fixed levels of the column factor.
%
%           ICC is the estimated intraclass correlation. LB and
%           UB are upper and lower bounds of the ICC with alpha
%           level of significance.
%
%           In addition to estimation of ICC, a hypothesis test
%           is performed with the null hypothesis that  $ICC = r_0$ .
%           The F value, degrees of freedom and the corresponding
%           p-value of the this test are reported.
%
%           (c) Arash Salarian, 2008
%
%           Reference: McGraw, K. O., Wong, S. P., "Forming
%           Inferences About Some Intraclass Correlation
%           Coefficients", Psychological Methods,
%           Vol. 1, No. 1, pp. 30-46, 1996
%

if nargin < 3
    alpha = .05;
end

if nargin < 4
    r0 = 0;
end

[n, k] = size(M);
[p, table] = anova_rm(M, 'off');

SSR = table{3,2};
SSE = table{4,2};
SSC = table{2,2};
SSW = SSE + SSC;

MSR = SSR / (n-1);
MSE = SSE / ((n-1)*(k-1));
MSC = SSC / (k-1);
MSW = SSW / (n*(k-1));

switch type
    case '1-1'
        [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_1_1(MSR,...
            MSE, MSC, MSW,alpha, r0, n, k);
    case '1-k'
        [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_1_k(MSR,...
            MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k);
    case 'C-1'
        [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_C_1(MSR,...
            MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k);
    case 'C-k'
        [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_C_k(MSR,...

```



```

        MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k);
case 'A-1'
    [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_A_1(MSR,...
        MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k);
case 'A-k'
    [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_A_k(MSR,...
        MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k);
end

%-----
function [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_1_1(MSR,...
    MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k)
r = (MSR - MSW) / (MSR + (k-1)*MSW);

F = (MSR/MSW) * (1-r0)/(1+(k-1)*r0);
df1 = n-1;
df2 = n*(k-1);
p = 1-fcdf(F, df1, df2);

FL = F / finv(1-alpha/2, n-1, n*(k-1));
FU = F * finv(1-alpha/2, n*(k-1), n-1);

LB = (FL - 1) / (FL + (k-1));
UB = (FU - 1) / (FU + (k-1));

%-----
function [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_1_k(MSR,...
    MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k)
r = (MSR - MSW) / MSR;

F = (MSR/MSW) * (1-r0);
df1 = n-1;
df2 = n*(k-1);
p = 1-fcdf(F, df1, df2);

FL = F / finv(1-alpha/2, n-1, n*(k-1));
FU = F * finv(1-alpha/2, n*(k-1), n-1);

LB = 1 - 1 / FL;
UB = 1 - 1 / FU;

%-----
function [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_C_1(MSR,...
    MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k)
r = (MSR - MSE) / (MSR + (k-1)*MSE);

F = (MSR/MSE) * (1-r0)/(1+(k-1)*r0);
df1 = n - 1;
df2 = (n-1)*(k-1);
p = 1-fcdf(F, df1, df2);

```

```

FL = F / finv(1-alpha/2, n-1, (n-1)*(k-1));
FU = F * finv(1-alpha/2, (n-1)*(k-1), n-1);

LB = (FL - 1) / (FL + (k-1));
UB = (FU - 1) / (FU + (k-1));

%-----
function [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_C_k(MSR, ...
    MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k)
r = (MSR - MSE) / MSR;

F = (MSR/MSE) * (1-r0);
df1 = n - 1;
df2 = (n-1)*(k-1);
p = 1-fcdf(F, df1, df2);

FL = F / finv(1-alpha/2, n-1, (n-1)*(k-1));
FU = F * finv(1-alpha/2, (n-1)*(k-1), n-1);

LB = 1 - 1 / FL;
UB = 1 - 1 / FU;

%-----
function [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_A_1(MSR, ...
    MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k)
r = (MSR - MSE) / (MSR + (k-1)*MSE + k*(MSC-MSE)/n);

a = (k*r0) / (n*(1-r0));
b = 1 + (k*r0*(n-1))/(n*(1-r0));
F = MSR / (a*MSC + b*MSE);
df1 = n - 1;
df2 = (a*MSC + b*MSE)^2/((a*MSC)^2/(k-1) + ...
    (b*MSE)^2/((n-1)*(k-1)));
p = 1-fcdf(F, df1, df2);

a = k*r/(n*(1-r));
b = 1+k*r*(n-1)/(n*(1-r));
v = (a*MSC + b*MSE)^2/((a*MSC)^2/(k-1) + ...
    (b*MSE)^2/((n-1)*(k-1)));

Fs = finv(1-alpha/2, n-1, v);
LB = n*(MSR - Fs*MSE)/(Fs*(k*MSC + ...
    (k*n - k - n)*MSE) + n*MSR);

Fs = finv(1-alpha/2, v, n-1);
UB = n*(Fs*MSR-MSE)/(k*MSC + (k*n - k - n)*MSE + n*Fs*MSR);

%-----
function [r, LB, UB, F, df1, df2, p] = ICC_case_A_k(MSR, ...
    MSE, MSC, MSW, alpha, r0, n, k)
r = (MSR - MSE) / (MSR + (MSC-MSE)/n);

```

```

c = r0/(n*(1-r0));
d = 1 + (r0*(n-1))/(n*(1-r0));
F = MSR / (c*MSC + d*MSE);
df1 = n - 1;
df2 = (c*MSC + d*MSE)^2/((c*MSC)^2/(k-1) + ...
    (d*MSE)^2/((n-1)*(k-1)));
p = 1-fcdf(F, df1, df2);

a = r/(n*(1-r));
b = 1+r*(n-1)/(n*(1-r));
v = (a*MSC + b*MSE)^2/((a*MSC)^2/(k-1) + ...
    (b*MSE)^2/((n-1)*(k-1)));

Fs = finv(1-alpha/2, n-1, v);
LB = n*(MSR - Fs*MSE)/(Fs*(MSC-MSE) + n*MSR);

Fs = finv(1-alpha/2, v, n-1);
UB = n*(Fs*MSR - MSE)/(MSC - MSE + n*Fs*MSR);

```

