

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Tales Humberto de Aquino Boratto

**ANÁLISE DINÂMICA APLICADA À PRATOS DE PERCUSSÃO DE
DIFERENTES LIGAS DE BRONZE**

Juiz de Fora

2019

Tales Humberto de Aquino Boratto

**ANÁLISE DINÂMICA APLICADA À PRATOS DE PERCUSSÃO DE
DIFERENTES LIGAS DE BRONZE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini

Coorientador: Alexandre Abrahão Cury

Juiz de Fora

2019

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

.
ANÁLISE DINÂMICA APLICADA À PRATOS DE PERCUSSÃO DE
DIFERENTES LIGAS DE BRONZE / Tales Humberto de Aquino Boratto.
– 2019.

43 f. : il.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini

Coorientador: Alexandre Abrahão Cury

Dissertação – UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, DE-
PARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA.
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 2019.

1. Pratos de Bateria. 2. Análise Dinâmica. 3. Bronze. 4. Indicadores Estatísticos. 5. FFT. I. Marcomini, Raphael Fortes, orient. II. Cury, Alexandre Abrahão, coorient. III. Título.

Tales Humberto de Aquino Boratto

**ANÁLISE DINÂMICA APLICADA À PRATOS DE PERCUSSÃO DE
DIFERENTES LIGAS DE BRONZE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 30 de Outubro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Alexandre Abrahão Cury - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Leonardo Goliatt da Fonseca
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais Ângela e José Geraldo, pois nada disso teria se concretizado sem a confiança de vocês. Obrigado por todo o apoio, incentivo, suporte e por sempre batalharem para que eu pudesse ir atrás dos meus sonhos.

Ao meu padrinho Paulo César que sempre me incentivou a ir além e forneceu todo o apoio para isso, aos meus irmãos Wagner e Ana e todos os familiares que participaram ativamente de toda esta caminhada, deixo registrado o meu profundo agradecimento por todos os momentos.

Não poderia deixar de agradecer a pessoa que me auxiliou a selecionar os pratos para este trabalho, meu professor e amigo Bráulio Mayrink, grande responsável pela minha formação musical. Que esse trabalho seja uma singela homenagem a todo desenvolvimento e crescimento ao longo desses anos. E nesse momento, aproveito para agradecer também a toda a equipe da Live escola de música que sempre me acompanharam.

Agradeço também ao estúdio Sonidus e o produtor musical Maurício Ávila, que prontamente me recebeu de portas abertas para que eu pudesse realizar as gravações para este trabalho.

Agradeço à UFJF e a todos os professores com que tive a oportunidade de estudar, por fornecerem o conhecimento que me foi passado nessa trajetória. Vocês foram essenciais em minha formação como engenheiro, alguns até se tornaram uma inspiração para mim. Em especial, aos professores Alexandre Cury, Raphael Marcomini e Renato Pagotto, obrigado por acreditarem e batalharem comigo neste tema proposto.

Não poderia deixar de agradecer ao Francisco Domene e toda a equipe Domene Cymbals, por me darem a oportunidade de conhecer mais a fundo todo este mundo dos pratos. O direcionamento e o conhecimento fornecido foi essencial para que eu tivesse condições de poder realizar este trabalho. “Bem-vindo a essa loucura! Ferreiro ou alquimista? Que o som reine!”, estas palavras resumem toda essa experiência e, com certeza, ficarão marcadas.

Por fim, agradeço à minha namorada Raissa pelo companheirismo, apoio e conselhos, meus companheiros de música e a todos meus amigos que de forma direta e indireta me ajudaram a chegar até aqui. Cada um com sua contribuição em seu momento formaram parte importante para essa vitória.

“Demore o tempo que for para decidir o que você quer da vida, e depois que decidir não recue ante nenhum pretexto, porque o mundo tentará te dissuadir”.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

Pratos de bateria são instrumentos musicais ancestrais que após passarem por diversos tipos de aplicações se tornaram equipamentos fundamentais de músicos bateristas. As diversas variáveis que influenciam em seu som final resultam em uma grande complexidade sonora e, representam uma imensa gama de sons que podem ser obtidos. Com o objetivo de estudar, caracterizar e diferenciar esses pratos percussivos a partir de metodologias de análises dinâmicas, três amostras com diferentes composições de bronze (CuSn8, CuSn10 e CuSn20) foram selecionadas. Para validar o uso destas escolhas, suas curvaturas foram medidas através de um relógio comparador adaptado sobre uma mesa com avanço regulável. Além disso, as espessuras de borda foram coletadas em oito pontos diametralmente opostos com o auxílio de um paquímetro. Para obter seus pesos, utilizou-se uma balança de precisão. Assim, a semelhança dos resultados foi a responsável pela validação das seleções. Sujeitando-os à gravação para captação de seus sons, foi possível obter seus respectivos sinais no tempo. Em seguida, foi realizada uma análise dos sinais do domínio da frequência, a partir da Transformada Rápida de Fourier (FFT), bem como uma comparação de dez indicadores estatísticos para cada material (Pico, Média, Média Quadrada, Raiz Média Quadrada, Variância, Desvio padrão, Assimetria, Curtose, Fator de Crista e Fator K). Ainda que tais análises tenham permitido discriminar as composições dos pratos do ponto de vista determinístico, o mesmo não pode ser dito no âmbito de uma análise probabilística.

Palavras-chave: Pratos de bateria. Análise Dinâmica. Bronze. Indicadores Estatísticos. FFT.

ABSTRACT

Cymbals are ancient musical instruments that after various types of applications became fundamental equipment for drummers. The many variables that influence the final sound results in a great sound complexity and, represents the huge range of sounds that can be obtained. In order to study, characterize and differentiate cymbals from dynamic analysis methodologies, three samples with different bronze compositions (CuSn8, CuSn10 and CuSn20) were selected. To validate the use of these choices, their curvatures were measured using a dial indicator adapted on a table with adjustable advance. In addition, the edge thicknesses were collected at eight diametrically opposite points with the aid of a caliper. A precision scale was used to obtain their weight. Thus, the similarity of the results was responsible for the validation. By subjecting them to recording to capture their sounds, it was possible to obtain their respective signals in time. Then, an analysis of the frequency domain signals was performed using the Fast Fourier Transform (FFT), as well as a comparison of ten statistical indicators for each material (Peak, Mean, Mean Square, Root Mean Square, Variance, Standard Deviation, Skewness, Kurtosis, Crest Factor and K Factor). Although such analyzes have allowed discriminating cymbals compositions from the deterministic point of view, the same can not be said for probabilistic analysis.

Key-words: Cymbals. Dynamic Analysis. Bronze. Statistical Indicators. FFT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Anatomia de um prato - vista lateral.	15
Figura 2 – Anatomia de um prato - vista real superior.	15
Figura 3 – Diagrama de equilíbrio Cu-Sn.	17
Figura 4 – Etapas da fabricação de um prato B8 e B10.	19
Figura 5 – Etapas de um prato B20. Da esquerda para a direita: a) Lingote. b) Laminado. c) Estampado com cúpula. d) Temperado. e) Martelado. f) Usinado.	20
Figura 6 – Micrografia de uma peça histórica de bronze com 23,35% de Sn em peso. A parte clara é referente à fase α e a estrutura em formatura de agulhas ao precipitado β	21
Figura 7 – Diferentes anatomias em um prato.	22
Figura 8 – Influência da espessura em um prato.	23
Figura 9 – Influência da curvatura de perfil em um prato.	23
Figura 10 – Gráfico ilustrativo dos parâmetros de Resposta, Decaimento e Sustentação (<i>Sustain</i>).	24
Figura 11 – Ilustração da transformação de domínios. a) DFT Real. b) DFT Complexa.	25
Figura 12 – Ilustração de método de desdobramentos sucessivos.	25
Figura 13 – Visualização da assimetria pelo gráfico de caixa.	28
Figura 14 – Leitura de um Gráfico de Caixa.	28
Figura 15 – Fluxograma da metodologia.	29
Figura 16 – Foto dos pratos utilizados no ensaio. a) B8. b) B10. c) B20.	30
Figura 17 – Foto da baqueta utilizada.	31
Figura 18 – Curvaturas medidas em laboratório.	33
Figura 19 – Transformada Rápida de Fourier.	33
Figura 20 – Transformada Rápida de Fourier em <i>Zoom</i>	34
Figura 21 – Gráfico de caixas referente aos indicadores estatísticos.	35
Figura 22 – Gráfico de caixas referente aos indicadores estatísticos.	35
Figura 23 – Histograma do valor de pico por faixa de volume.	36
Figura 24 – Maiores e menores valores dos volumes por ensaio.	37
Figura 25 – Primeiros e terceiros quartis dos dados por ensaio.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos principais tipos de prato de acordo com o tamanho. . .	13
Tabela 2 – Nomenclatura das ligas baseada em suas composições químicas.	16
Tabela 3 – Influência das dimensões no som dos pratos.	24
Tabela 4 – Cálculo dos indicadores estatísticos.	27
Tabela 5 – Pratos utilizados nos ensaios.	32
Tabela 6 – Espessuras de borda e pesos dos pratos utilizados.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
FFT	Fast Fourier Transform
DFT	Discret Fourier Transform
IE	Indicadores Estatísticos
LS	Limite Superior
LI	Limite Inferior
Q_1	Primeiro Quartil
Q_3	Terceiro Quartil

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Velocidade de propagação da onda sonora no material
E	Módulo de elasticidade
ρ	Densidade do material
λ	Amplitude da onda
f	Frequência da onda sonora
x_n	Amostra temporal do sinal no tempo
n	Contador de amostras temporais do sinal
k	Ordem harmônica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Anatomia dos pratos	15
2.1.1	Processos de Fabricação	17
2.1.1.1	Processos de fabricação dos pratos B8 e B10	18
2.1.1.2	Processos de fabricação dos pratos B20	19
2.1.2	Influência Geométrica	21
2.2	Transformada de Fourier	24
2.3	Indicadores Estatísticos	26
2.4	Gráfico de caixa	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	Definição das amostras	30
3.2	Registro Sonoros	30
3.3	Comparação gráfica	31
4	RESULTADOS E ANÁLISES	32
5	CONCLUSÕES	39
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	39
	REFERÊNCIAS	41
	ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE	43

1 INTRODUÇÃO

Pratos de bateria, também chamados de pratos de percussão, ou simplesmente *Cymbals* são instrumentos musicais essenciais e que estão cada vez mais presentes na vida dos músicos bateristas, contribuindo para a identidade sonora do artista. Dessa forma, existe uma busca contínua por sonoridades que sejam características, fazendo com que muitos destes músicos testem sons em objetos cotidianos, tais como frigideiras, garrafas de cerveja, latas de lixo metálicas entre outros, de modo que se atenda ao que é desejado. É exatamente essa demanda que faz com que surjam cada vez mais novos e diferentes produtos no mercado musical.

Desde seu primeiro antepassado há cerca de 3000 anos até se tornar um constituinte fundamental das baterias acústicas, os pratos tiveram diferentes e variadas aplicações, tais como adorações a deuses, utilização em funerais e festas. Porém, foi no uso como taça de bebidas pelos romanos que surgiu a palavra *Cymbals*, derivada do grego *Kymbos* [1].

Embora o livro chinês de referência em instrumentos musicais (*Yo Shu*) confira ao Tibete, Índia e Turquia como possíveis locais de surgimento dos pratos de bateria, a China foi quem ficou conhecida como primeiro país a fabricá-los [2]. Ao que tudo indica, já naquela época se fabricava pratos em uma liga de bronze com composição aproximada de 80% de cobre e 20% de estanho [2]. Essa tradicional liga continua sendo utilizada na fabricação destes produtos em todo o mundo e, em alguns casos, ainda com um processo um tanto arcaico. Por outro lado, algumas empresas investiram em pesquisa, desenvolvimento e tecnologia aliando produtividade à uma característica artesanal intencional.

No Brasil, apenas uma empresa fabrica este tipo de pratos do zero. Algumas compram peças do metal bruto (ou *Blanks*) e o trabalham para dar forma ao prato. No entanto, a maior parte dos fabricantes nacionais utiliza outras composições de bronze que possuem uma maior facilidade de conformação, ganhando mais produtividade com isso. Entretanto, outras ligas são encontradas no mercado. Além dos bronzes, existem pratos fabricados em latão, níquel prateado e até em aço inox, assim, essa grande variedade de produtos representa a imensa gama de sons que podem ser obtidos.

Apesar de uma geometria simples deste instrumento, existe uma grande complexidade sonora envolvida. Dessa forma, diferentes sons podem ser obtidos de dois pratos semelhantes e vice-versa. Isso acontece por conta das inúmeras variáveis que influenciam no som final dos mesmos, a saber: a liga metálica, os processamentos industriais na fabricação, a geometria, o acabamento superficial, etc. E aliado às características físicas do instrumento, a intensidade, a região do toque e o modo de como se dá o contato da baqueta com o prato também estão relacionadas às diferenças nos sons.

A variação em seus tamanhos (diâmetro externo), espessuras e peso, acabamentos superficiais e formatos (geometria), dá origem a diversas classificações possíveis. Inicial-

mente, mostra-se na Tabela 1 os tipos principais de pratos da bateria classificados por seus tamanhos, embora na prática essa classificação seja flexível.

Tabela 1 – Classificação dos principais tipos de prato de acordo com o tamanho.

Condução (<i>Ride</i>):	Pratos com diâmetro normalmente na faixa de 18 a 24 polegadas.
Ataque (<i>Crash</i>):	Pratos com diâmetro normalmente na faixa de 14 a 18 polegadas.
Chimbal (<i>Hi-Hat</i>):	Pratos com diâmetro normalmente na faixa de 10 a 14 polegadas.

Fonte: Adaptado de [3].

Em se tratando da aplicação, tem-se de forma simplificada que o *Ride* normalmente é utilizado para a condução de um ritmo, assim como sugere seu nome. O *Crash* é mais usado para marcar acentuações e ataques ou, de forma geral, quando necessita-se de destaque. Já o *Hi-Hat* pode ser utilizado tanto para conduzir um ritmo quanto para marcações.

1.1 Motivação

Existe uma crescente busca por novos sons e que sejam característicos na identidade de um músico. Nesse aspecto, os pratos representam uma grande parcela deste mercado, uma vez que permitem obter uma extensa gama de sons diferentes. Portanto, é de interesse compreender a composição sonora de um prato desde a escolha de seu material, que é quem fornece a base de seu som final.

Aliado a estes fatores, o meu fascínio pela vibração dos pratos e a necessidade de se validar conceitos populares entre os bateristas, complementam a motivação para a realizar este trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é propor a aplicação de metodologias de análise dinâmica e estatística a pratos de bateria de diferentes ligas de bronze, a fim de detectar diferenças nas vibrações que caracterizem seus materiais.

1.2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Conhecer os diferentes materiais de composição dos pratos e seus respectivos processos de fabricação;
- Entender os fatores que alteram a acústica do prato;

- Medir aspectos geométricos das amostras;
- Registrar os sons das amostras em estúdio;
- Aplicar a Transformada Rápida de Fourier (FFT) aos sinais sonoros;
- Calcular Indicadores Estatísticos para cada material;
- Avaliar as variações de resposta das gravações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Anatomia dos pratos

De acordo com Werner (2015, p.57), pratos de bateria podem ser definidos como sendo “um disco metálico fino apoiado através de um furo no centro”. Dentro desta definição, pode-se ter uma variação de formato, tamanho, espessura, peso e acabamento superficial, que conferem uma característica sonora diferente ao instrumento. De forma geral, e para os tipos de pratos apresentados na Tabela 1, suas geometrias são compostas de uma cúpula em sua parte central e um perfil achatado ao redor, conforme mostram as Figuras 1 e 2. Entretanto, essa geometria é variável, de forma que existam diversos tamanhos de cúpula, de diâmetro externo e graus de convexidade do perfil.



Figura 1 – Anatomia de um prato - vista lateral.

Fonte: Adaptado de [3]



Figura 2 – Anatomia de um prato - vista real superior.

Fonte: Adaptado de [4]

Quando se deseja projetar ou fabricar um prato, é preciso ter em mente que, para este tipo de aplicação, é necessário conciliar maleabilidade, rigidez, dureza e tensão de ruptura, por desempenharem um papel crítico nas propriedades acústicas do equipamento [5, 6] e estarem a todo momento sendo solicitados mecanicamente. Por conta disso, ligas de cobre são preferíveis e as mais utilizadas [5], podendo ser de Bronze (Cu-Sn), Latão (Cu-Zn) e Níquel Prateado (Cu-Ni-Zn) [7]. Dentro destas opções, os de Bronze são os mais encontrados e de melhor desempenho nas propriedades mecânicas citadas anteriormente.

Entretanto, existem diversas ligas de bronze para esse tipo de aplicação que são classificadas de acordo com a concentração de estanho. Dessa forma e dentre as possíveis, utiliza-se mais frequentemente as ligas CuSn8 (com 8% em peso de estanho) e CuSn20 (com 20% em peso de estanho). Por conta desta variedade de combinações, muitas empresas de pratos adotam uma nomenclatura mais prática para seus produtos baseadas nas composições dos bronzes, para que seus clientes saibam exatamente o que estão comprando [8]. Então, um prato dito B20 corresponde a uma composição de 80% de cobre e 20% de estanho (CuSn20), assim como um B10 se refere a 90% de cobre e 10% de estanho (CuSn10) e um B8 a 92% de cobre e 8% de estanho (CuSn8). Dessa forma, a Tabela 2 resume como se dá essa nomenclatura.

Tabela 2 – Nomenclatura das ligas baseada em suas composições químicas.

Nomenclatura	% Cu	% Sn
B8	92	8
B10	90	10
B12	88	12
B15	85	15
B20	80	20

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos nomes que acompanham as mudanças de composição, as estruturas, e consequentemente, as propriedades mecânicas, também se alteram. Observando o diagrama de fases para o cobre e estanho (Figura 3), é possível extrair mais informações e perceber que as ligas B8 e B10 apresentam uma microestrutura formada unicamente pela fase α , ao passo que a liga B20 é constituída de uma solução sólida de fase α com fase β , ou seja, não é um material homogêneo, por conta do aparecimento do precipitado β . Portanto, essa diferença microestrutural faz com que os bronzes monofásicos assumam uma estrutura cristalina igual ao do cobre: cúbica de face centrada (CFC) [6, 9], enquanto a fase β presente nos bronzes B20 apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) [10].

O acréscimo da concentração de estanho em peso nas ligas provoca um aumento da rigidez, da dureza e da fragilidade do material [6] devido ao surgimento de um precipitado quebradiço. Por conta disso, existe uma dificuldade de se aumentar a solubilidade de

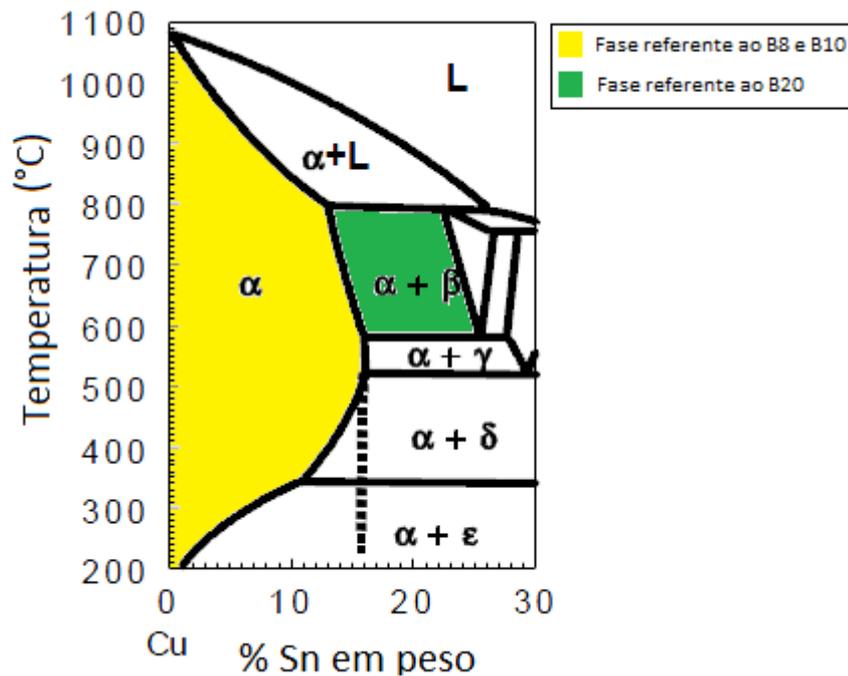


Figura 3 – Diagrama de equilíbrio Cu-Sn.

Fonte: Adaptado de [6]

estanho nas ligas em uma porcentagem um tanto maior a 20% em peso [7], pois este procedimento acarretaria em complicações na fabricação destes tipos de pratos. Entretanto, a rigidez do material se relaciona com a velocidade de propagação da onda sonora no meio através da Equação 2.1, assim, a diferença entre os bronzes também se traduz em diferenças acústicas.

Além disso, isoladamente para o prato de liga B20, existe um aumento natural de sua fragilidade devido ao fator de idade ou *aging*. Esse fenômeno consiste na decomposição da fase β em fase δ que é mais frágil (como pode ser visto pela Figura 3), alterando as propriedades mecânicas da liga [10] e, por consequência, as sonoras.

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.1)$$

2.1.1 Processos de Fabricação

É impossível falar da acústica destes instrumentos sem levar em consideração os processos de fabricação. Existe uma correlação muito grande entre estes dois aspectos, pois é na fabricação onde se concentra a maior parte dos fatores que modificam seus sons. Assim, cada etapa do processo é responsável por uma alteração física que influenciará a acústica final.

Como visto anteriormente, o acréscimo de estanho nas ligas acarreta em diferentes

propriedades mecânicas dos materiais. Portanto, os processos de fabricação para os pratos de bronzes B8 e B10 são, de forma geral, diferentes para os de bronzes B20. Nesse aspecto, esses processos serão abordados separadamente, estando baseados em produções de fábricas brasileiras.

2.1.1.1 Processos de fabricação dos pratos B8 e B10

Por se tratarem de materiais homogêneos, isto é, apresentarem uma única fase em sua microestrutura, os processos de fabricação aqui envolvidos permitem uma produção mais rápida, em maior escala e mais barata.

Tudo começa pela compra de bobinas de bronze comercial que contenham a especificação de espessura desejada. Ou seja, para se fabricar pratos de diferentes espessuras, utilizam-se diferentes bobinas¹ [11]. Posteriormente, é necessário retificar esta matéria prima, a fim de se obter uma chapa plana. Este processo acontece gradualmente em uma calandra conectada a uma guilhotina, de forma que o pedaço da bobina já retificado seja recortado em quadrados com dimensões aproximadas aos diâmetros dos pratos que se deseja fabricar. Em seguida, uma furadeira de bancada faz o furo de centro destes recortes um a um, que então são levados para uma tesoura de corte industrial que os deixará em um formato circular. Ao final desta primeira etapa de processos, obtém-se o então chamado *Blank*, que corresponde a uma espécie de subproduto que pode dar origem a qualquer linha ou série de prato daquele material [11].

Embora a Figura 4 ilustre algumas etapas de um outro processo de fabricação de pratos em liga B8, diferente ao que está sendo abordado, ela consegue ilustrar o que seria um *blank* de B8 ou B10, correspondente à etapa de chapa plana lisa no canto superior esquerdo da imagem.

Para dar o formato de prato ao *Blank*, utiliza-se um torno de repuxo, onde as matrizes podem variar em diâmetro e geometria, a depender do prato que está sendo fabricado. Em seguida, um martelo pneumático ou hidráulico é responsável por conferir marcas determinadas e arrançadas, isto é, com um formato específico e não aleatórias ao longo do perfil do prato [11]. A finalidade destas marcações é modificar a trajetória da onda sonora no material e, por consequência, proporcionar uma parte da característica do som final de determinado prato²

Feito isso, os pratos são levados ao forno para serem submetidos a um tratamento térmico de recozimento, para aliviar tensões residuais conferidas ao material durante todos os processamentos anteriores. A temperatura e o tempo de recozimento variam de acordo com a série a ser fabricada [11].

¹ Comunicação pessoal de Francisco Domene, em 10 de março de 2019.

² Comunicação pessoal de Francisco Domene, em 10 de março de 2019.

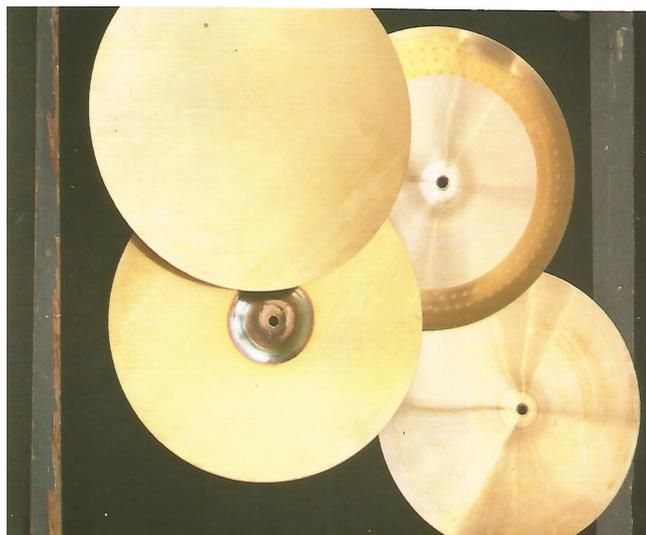


Figura 4 – Etapas da fabricação de um prato B8 e B10.

Fonte: [1]

Por fim, dá-se início à etapa de acabamentos finais, a começar pelo polimento que tem por finalidade dar brilho e tirar eventuais riscos no material provenientes da fabricação da bobina. Após esta etapa, os pratos são envernizados para evitar possíveis oxidações. Finalizando o processo, antes de darem entrada ao estoque, os produtos são marcados com a identificação do modelo e a logomarca da empresa [11].

2.1.1.2 Processos de fabricação dos pratos B20

A presença do precipitado quebradiço β na microestrutura deste material acarreta em uma maior dificuldade de processamento [5] e, conseqüentemente, em uma produtividade menor. Por exemplo, em algumas fábricas do exterior o processo inteiro desde a concepção da liga até a identificação final do prato, gira em torno de três semanas, sendo que a maior parte deste tempo é referente a um “descanso” do material entre cada processo de fabricação [1]. Entretanto, outras fábricas não adotam este procedimento, o que acarreta em uma diminuição deste tempo de produção que, mesmo assim, continua sendo muito superior ao método de fabricação das ligas B8 e B10.

O início da fabricação se dá pela obtenção dos lingotes de bronze. Para isso é necessário primeiramente fundir o cobre junto a uma quantidade de estanho proporcional em peso ao que se deseja atingir (neste caso, 20% do peso total do fundente para se obter a liga B20). Então, após a homogeneização do soluto, o metal líquido é vertido em lingoteiras horizontais em formato de cuia, obtendo-se assim, os lingotes, como mostrado na Figura 5 a.

Dando seqüência, os lingotes são laminados à quente até atingirem a forma de uma chapa com espessura e tamanho de área superficial suficientes para a fabricação do



Figura 5 – Etapas de um prato B20. Da esquerda para a direita: a) Lingote. b) Laminado. c) Estampado com cúpula. d) Temperado. e) Martelado. f) Usinado.

Fonte: [1]

prato desejado, como a ilustrada pela Figura 5 b. Para cumprir essa etapa, são necessários aproximados 10 passes de laminação, com reaquecimento até $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre cada um. Posteriormente, as chapas são novamente aquecidas e então submetidas à estampagem a quente da cúpula, que pode ser dada em diversos tamanhos, a depender da matriz utilizada, chegando à terceira forma mostrada pela Figura 5 c.

Até então, o material em suas condições normais apresenta uma estrutura muito quebradiça. A elevação da temperatura nos processos de conformação à quente levou o material para uma composição de fases α e β . Entretanto, a lenta taxa de resfriamento ao ambiente decompõe essas fases em α e δ , sendo esta última a responsável pela fragilização do material [10]. Para minimizar esse efeito de fragilização, realiza-se um tratamento térmico de têmpera que tem como efeito a formação de agulhas martensíticas no precipitado β e o congelamento desta estrutura no material, como mostra a Figura 6 [10].

Neste procedimento, o material é submetido a um banho em solução de salmoura e posteriormente levado ao forno para que se aqueça até $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, momento em que se resfria bruscamente o material em água. Observando-se a Figura 5 d, é possível perceber que o material após a têmpera apresenta uma coloração diferente dos processos anteriores. Isso é decorrente do banho de salmoura que antecedeu o tratamento térmico, que tem como função a retirada dos óxidos de estanho [1].

Assim, após esses processos, faz-se o recorte circular destes produtos, além do furo de centro do prato feito com uma furadeira de bancada. Com a realização destas operações, obtém-se o *Blank* que, diferentemente do obtido no método de fabricação dos pratos B8 e B10, este apresenta uma superfície irregular, ou seja, bastante deformada.

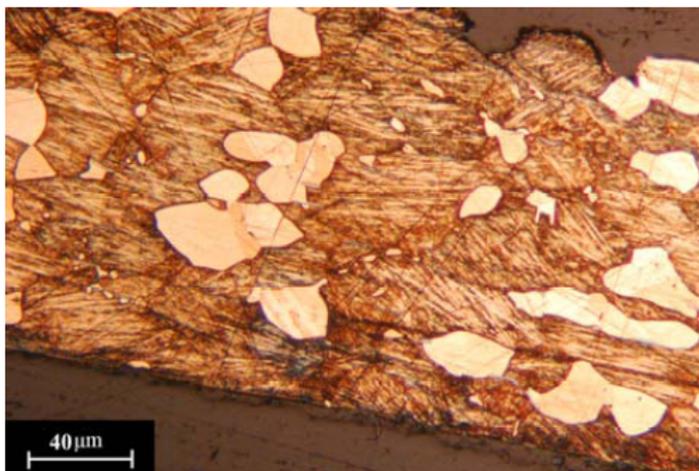


Figura 6 – Micrografia de uma peça histórica de bronze com 23,35% de Sn em peso. A parte clara é referente à fase α e a estrutura em formatura de agulhas ao precipitado β .

Fonte: [10]

A geometria final do prato B20 é dada através do processo de forjamento a frio em temperatura ambiente por martelamento manual, que também tem a finalidade melhorar o seu som, por conta das tensões residuais impostas em toda a sua superfície e que tensionam o material.

Assim, ao atingir o formato final desejado, o prato é então submetido à usinagem para desbaste, afunilamento da espessura e para acabamento superficial, sendo estas etapas dependentes do tipo de prato em fabricação, podendo ser realizadas ou não. O processo de torneamento se dá em um torno artesanal específico, utilizando ferramenta de corte de metal duro e rotações na faixa de 200 a 350 rpm [12]. Entretanto, a profundidade e a distância entre as ranhuras estão diretamente associadas a propagação das ondas sonoras no material, influenciando a acústica do prato³ [1]. Posteriormente a este processo de usinagem, o prato é marcado com a identificação de sua série e a logomarca da empresa.

2.1.2 Influência Geométrica

As características geométricas do prato também são um fator extremamente importante na caracterização final do som. Portanto, é preciso conhecer os efeitos do tamanho da cúpula, peso e espessura, perfil e do diâmetro externo [13]. A localização destes parâmetros no prato é dada pelas Figuras 1, 2 e 7 .

Entretanto, o efeito de um parâmetro pode ser corrigido na modificação de outro(s) e, dessa forma, as influências dos resultados mostrados a seguir são tomadas com a condição ou a suposição de que apenas o aspecto em questão é modificado, sem a alteração de nenhum outro.

³ Comunicação pessoal de Francisco Domene, em 11 de março de 2019.

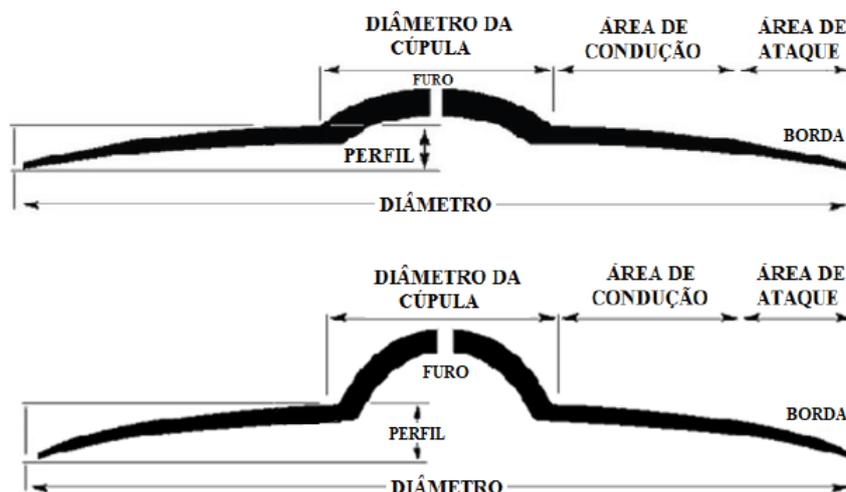


Figura 7 – Diferentes anatomias em um prato.

Fonte: Adaptado de [13]

Iniciando-se pelo tamanho da cúpula de um prato, este fator normalmente está associado à velocidade de resposta ao toque, à produção de harmônicos e à projeção de som em volume. Dessa forma, uma cúpula maior confere ao prato uma tendência de resposta mais rápida ao toque com mais harmônicos e mais volume, comparada a uma cúpula menor [1, 13].

O peso é um fator que está diretamente relacionado à espessura do prato. Assim, de acordo com Pinksterboer (1992, p.71) “mais metal significa mais volume, resposta mais lenta e um *sustain* mais longo”, de forma que o *sustain* se refere à sustentação do som. Entretanto, o aumento do peso tende a aumentar o timbre agudo do prato [1].

Modelos com menores espessuras (*Thin*) correspondem a pratos mais leves. Portanto, apresentam uma menor projeção de volume (leve a moderado) e respondem ao toque mais rapidamente [13]. Em contrapartida, modelos mais pesados (*Heavy*) correspondem a pratos mais espessos, que tendem a produzir sons de maior duração, mais agudos e com maior projeção de volume [13]. Porém, apresentam uma faixa de frequências emitidas menor, por conta de a maior quantidade de material limitar a produção de harmônicos [1]. Já os pratos classificados de peso intermediários ou *Medium* pelos próprios fabricantes acabam se tornando mais versáteis, por apresentarem uma mistura das características dos *Thin Cymbals* com os *Heavy Cymbals* [13].

Ainda dentro do aspecto de espessura, existe o afunilamento ou *taper* que é uma variável importante a ser mencionada e consiste em uma diminuição gradual da espessura do prato ao longo de seu raio, de forma que a borda fique mais fina do que a parte central. Isso resulta em uma resposta mais rápida ao toque e um decaimento também mais rápido do som [1].

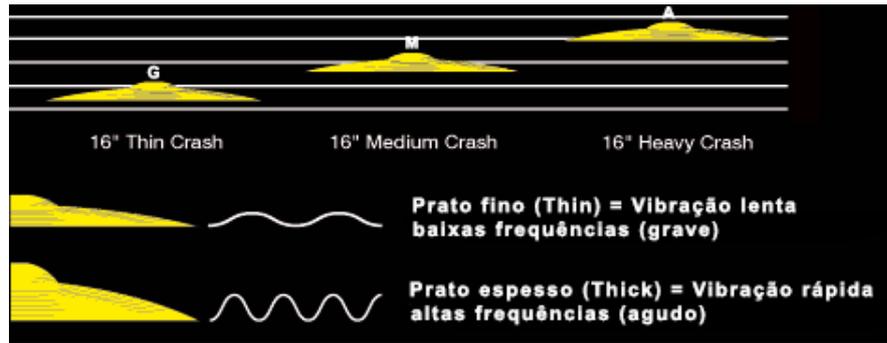


Figura 8 – Influência da espessura em um prato.

Fonte: Adaptado de [4]

Em se tratando do perfil do prato, este se apresenta como um fator influente sobre o timbre. O aumento da concavidade está relacionado ao aumento de tensão superficial do material. Desta forma, pratos de maior curvatura possuem um timbre mais agudo e menor emissão de harmônicos que, conseqüentemente, darão maior definição de som ao prato. Por outro lado, um perfil mais plano ou *flat* acarreta em um som mais grave e com mais harmônicos, além de ter uma resposta ao toque mais rápida [1]

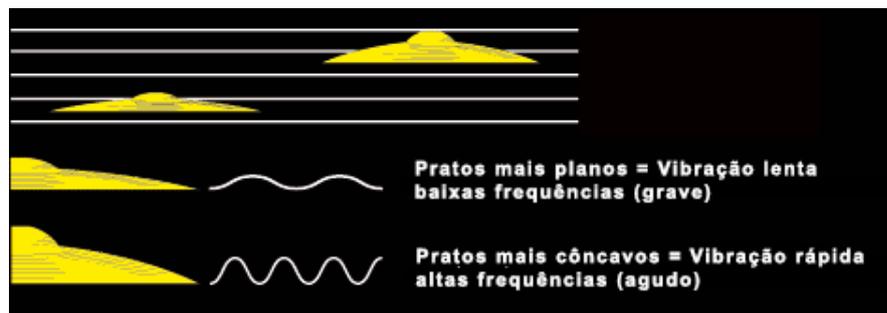


Figura 9 – Influência da curvatura de perfil em um prato.

Fonte: Adaptado de [4]

Por fim, o tamanho do diâmetro de um prato tem relação com a capacidade de o mesmo deslocar mais ou menos ar e, assim, influencia em sua projeção de volume. Dessa forma, quanto maior o raio, mais ar pode ser deslocado e, portanto, maior será o volume que se pode produzir. Porém, a maior quantidade de material faz com que o seu tempo de resposta ao toque seja maior, assim como a duração de seu som [1].

Ainda dentro deste parâmetro, outra perspectiva a ser observada está relacionada à tendência do timbre, que é mais grave quanto maior o prato em diâmetro. Isso acontece pois o aumento da área superficial oferece ainda mais espaço para que as ondas sonoras de menor frequência possam se propagar no material, uma vez que possuem comprimento de onda maior do que as frequências mais altas (agudo) [1] seguindo a equação da velocidade de propagação de ondas:

$$V = \lambda \cdot f \quad (2.2)$$

De forma resumida, a Tabela 3 compila as informações acima apresentadas:

Tabela 3 – Influência das dimensões no som dos pratos.

Dimensão Influência em	Tamanho		Espessura / Peso		Perfil		Cúpula		Afunilamento	
	Pequeno	Grande	Fino (<i>Thin</i>)	Pesado (<i>Heavy</i>)	Baixo	Alto	Pequena	Grande	Mantém	Gradual
Timbre	<i>Alto</i>	<i>Baixo</i>	<i>Baixo</i>	<i>Alto</i>	<i>Baixo</i>	<i>Alto</i>	-	-	<i>Alto</i>	<i>Baixo</i>
Volume	<i>Baixo</i>	<i>Alto</i>	<i>Suave</i>	<i>Alto</i>	-	-	<i>Suave</i>	<i>Alto</i>	-	-
Resposta	<i>Rápida</i>	<i>Devagar</i>	<i>Rápida</i>	<i>Devagar</i>	<i>Rápida</i>	<i>Devagar</i>	<i>Devagar</i>	<i>Rápida</i>	<i>Devagar</i>	<i>Rápida</i>
Decaimento	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	-	-	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>
Harmônicos	-	-	<i>Mais</i>	<i>Menos</i>	<i>Mais</i>	<i>Menos</i>	<i>Menos</i>	<i>Mais</i>	<i>Menos</i>	<i>Mais</i>

Fonte: [1]

Cada aspecto destacado na Tabela 3 pode ser entendido como:

- Timbre: características sonoras gerais de um prato [13].
- Volume: nível de audibilidade do som.
- Resposta: tempo que leva para atingir o pico de volume após a batida no prato.
- Decaimento: tempo entre o pico de volume até o de sustentação.
- Harmônicos: múltiplas frequências de som relacionadas a uma frequência natural.

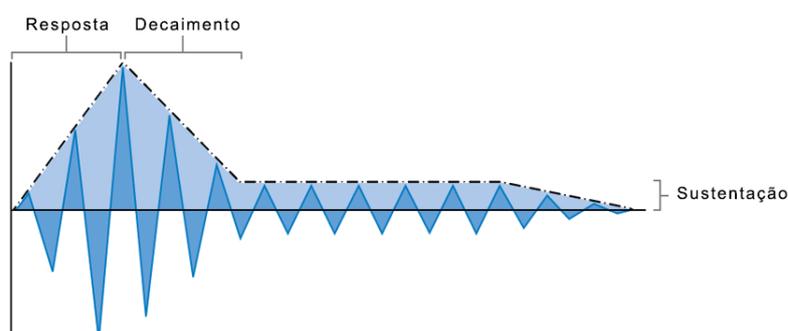


Figura 10 – Gráfico ilustrativo dos parâmetros de Resposta, Decaimento e Sustentação (*Sustain*).

Fonte: Adaptado de [14]

2.2 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é uma ferramenta muito utilizada para processamento de sinais. Dessa forma, um som periódico, como é o caso dos instrumentos musicais, pode ser decomposto em uma soma de sons puros de frequência [15].

Para isso, utiliza-se um algoritmo que calcula a transformada discreta de Fourier (TDF ou, do inglês, DFT: *Discret Fourier Transform*) e a sua inversa, isto é, transporta um sinal do domínio do tempo para o da frequência e vice-versa. A esse algoritmo, dá-se o nome de Transformada Rápida de Fourier (TRF), ou simplesmente FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*) [16].

A DFT real leva um sinal pertencente ao domínio do tempo, composto N pontos, em dois sinais no domínio da frequência com $N/2$ pontos cada um, sendo um destes a parte real e o outro a imaginária de um número complexo, como mostra a Figura 11 a. Já a DFT complexa transforma dois sinais no domínio do tempo (parte real e imaginária) em outros dois no domínio da frequência, também com parte real e imaginária [16, 17], como mostra a Figura 11 b.

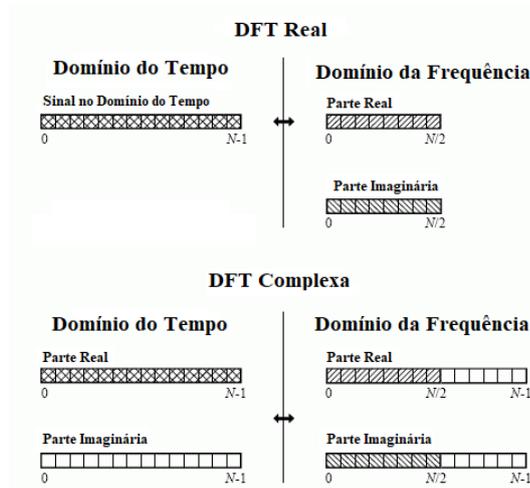


Figura 11 – Ilustração da transformação de domínios. a) DFT Real. b) DFT Complexa.

Fonte: [17]

Dessa forma, utiliza-se o método de desdobramentos sucessivos (Figura 12) para o cálculo da FFT. Este método funciona decompondo um sinal em outros dois e assim sucessivamente, até que cada sinal seja referente a um único ponto [16, 17].

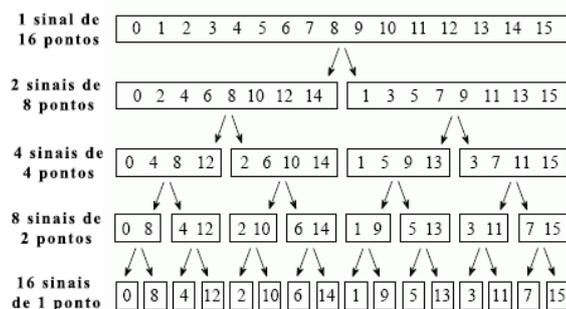


Figura 12 – Ilustração de método de desdobramentos sucessivos.

Fonte: [17]

De forma prática, o algoritmo processa um número de amostras N no domínio do tempo e calcula $N/2$ pontos pertencentes ao sinal no domínio da frequência, dentro de um intervalo $0 < \omega < \pi/T$, onde T é o intervalo de amostragens. Utilizando-se o princípio da superposição e levando em consideração o modelo matemático que descreve um espectro de sinal, pode-se escrever a Equação 2.3 que é a forma compacta da representação do cálculo do algoritmo para a transformada de Fourier [18]:

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi n \frac{k}{N}} = \sum_{k=0}^{N-1} x_n W^{nk} \quad (2.3)$$

onde:

- x_n é a amostra temporal do sinal;
- $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, é o contador das amostras temporais do sinal;
- $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, é a ordem harmônica.

A grande vantagem do uso da FFT está na redução do número de operações, de forma que as N^2 multiplicações de números complexos e $N(N - 1)$ somas complexas, são reduzidas para $2N(\log_2 N)$ multiplicações complexas, diminuindo o tempo de processamento do algoritmo [16, 18].

2.3 Indicadores Estatísticos

Os indicadores estatísticos são uma forma de se trabalhar com medições dinâmicas no domínio do tempo. Esse tipo de análise é mais simples que a modal e se faz necessário para obter informações relevantes a respeito dos sinais dinâmicos de estruturas [19]. É um tipo de metodologia muito utilizado em *Machine Learning* para a determinação das variáveis de entrada, de forma que se obtenham resultados mais confiáveis [19]. Neste trabalho, dez indicadores estatísticos são utilizados como mostrados na Tabela 4. Para cada um deles, é possível extrair uma informação referente aos dados coletados.

O pico (IE1), ou amplitude, é a magnitude máxima da oscilação de um sinal. A média (IE2), média quadrada (IE3) e a raiz da média quadrada (também chamado de valor eficaz, que mede a energia de vibração) (IE4) são os indicadores relacionados com a tendência de concentração dos dados [19].

Já a variância (IE5) e o desvio padrão (IE6) medem a dispersão dos pontos em relação à média, ou valor médio, da amostra de dados [19]. A assimetria (IE7), ou obliquidade, mede a falta de simetria de uma distribuição de dados, enquanto a curtose (IE8) está relacionada com o achatamento da curva de distribuição.

Tabela 4 – Cálculo dos indicadores estatísticos.

Pico (IE 1) $x_{pico} = \max x $	Média (IE 2) $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Média Quadrada (IE 3) $x_{eq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2$	Raiz da Média Quadrada (IE 4) $rms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2}$
Variância (IE 5) $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	Desvio Padrão (IE 6) $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Assimetria (IE 7) $A = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}$	Curtose (IE 8) $C = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}$
Fator de Crista (IE 9) $F_C = \frac{x_{pico}}{rms}$	Fator K (IE 10) $F_k = x_{pico} * rms$

Fonte: Adaptado de [19]

O fator de crista (IE9) é a relação entre o pico do sinal e a raiz da média quadrada, ou valor eficaz. Este indicador é útil para indicar a presença de uma magnitude de pico fora do padrão [20]. Já o fator K (IE10) é um número utilizado para o cálculo da incerteza expandida, determinado pela multiplicação do valor de pico pelo valor eficaz.

2.4 Gráfico de caixa

O gráfico de caixa ou *boxplot* é uma ferramenta gráfica com o objetivo avaliar a dispersão dos dados e fornecer informações a respeito de cinco parâmetros (valor mínimo e máximo, primeiro e terceiro quartil e a mediana) para uma sequência de dados [21, 22]. É comum utilizar esse gráfico em conjunto dos indicadores estatísticos, de maneira que cada IE seja representado por uma caixa. Dessa forma, facilita-se a visualização e a comparação dos dados, principalmente quando se tem mais de uma família de distribuição e que é preciso comparar, entre elas, cada IE obtido. Por exemplo, a Figura 13 mostra a representação do IE de assimetria no *boxplot* e a Figura 14 indica o significado de cada parte do gráfico.

O primeiro quartil é o valor que representa os primeiros 25% da amostra ordenada. A linha da mediana representa o centro da distribuição dos dados. Dessa forma, pode-se

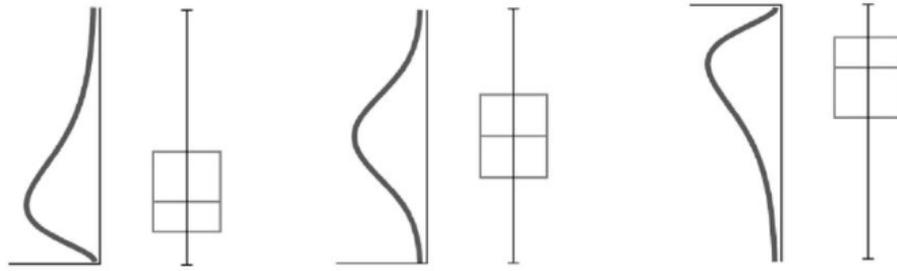


Figura 13 – Visualização da assimetria pelo gráfico de caixa.

Fonte: [23]

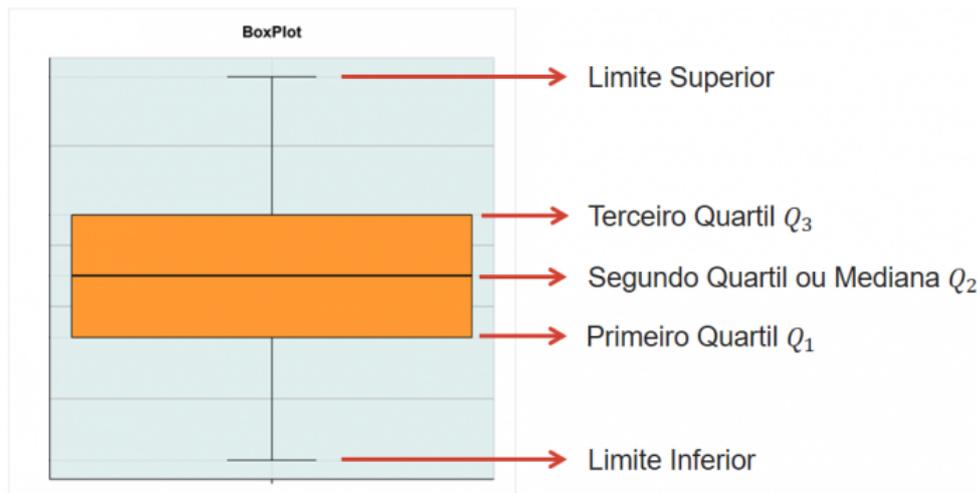


Figura 14 – Leitura de um Gráfico de Caixa.

Fonte: [21]

indicar a assimetria da distribuição, quando estiver deslocada do centro do retângulo (exemplo da Figura 13), uma vez que o mesmo só contém 50% dos valores da série de dados. O terceiro quartil é o valor a partir do qual se encontram os 25% finais dos valores ordenados da distribuição. A dispersão, no entanto, é interpretada pela diferença entre o valor máximo e o valor mínimo, de forma que quanto maior esta diferença, maior a variação dos dados [24, 25].

Pontos usualmente representados por um (*) são os chamados *outliers*, isto é, são valores atípicos, que fogem ou se afastam da tendência. Por consequência, estes dados se localizam fora dos limites superior (LS) e inferior (LI), calculados por [25]:

$$LS = Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1) \quad (2.4)$$

$$LI = Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1) \quad (2.5)$$

3 METODOLOGIA

O fluxograma mostrado na Figura 15 ilustra a sequência de atividades desenvolvidas na metodologia geral do trabalho. Pode-se perceber que os processos iniciais foram realizados em série, pois correspondem à obtenção de requisitos para os futuros tratamentos de dados. Estes, no entanto, são dispostos de forma paralela, por conta de não haver uma interdependência entre os resultados, ou seja, a saída de um processamento não é a entrada do outro.

De forma resumida, primeiramente foi preciso selecionar quais pratos seriam as amostras para os testes, verificando para cada escolha se os critérios de seleção, descritos na Seção 3.1 a seguir, eram satisfeitos. Posteriormente, o registro de som foi coletado para todas as amostras e então utilizados como entradas para o processo de tratamento dos dados nas metodologias de análise dinâmica e estatística: FFT e IE.

Com os resultados tratados, precisou-se saber o quanto de incerteza estaria envolvida nos experimentos, e dessa forma, obteve-se o histograma para cada registro de som, um gráfico com os máximos e mínimos volumes e um com os primeiros e terceiros quartis de cada amostragem.

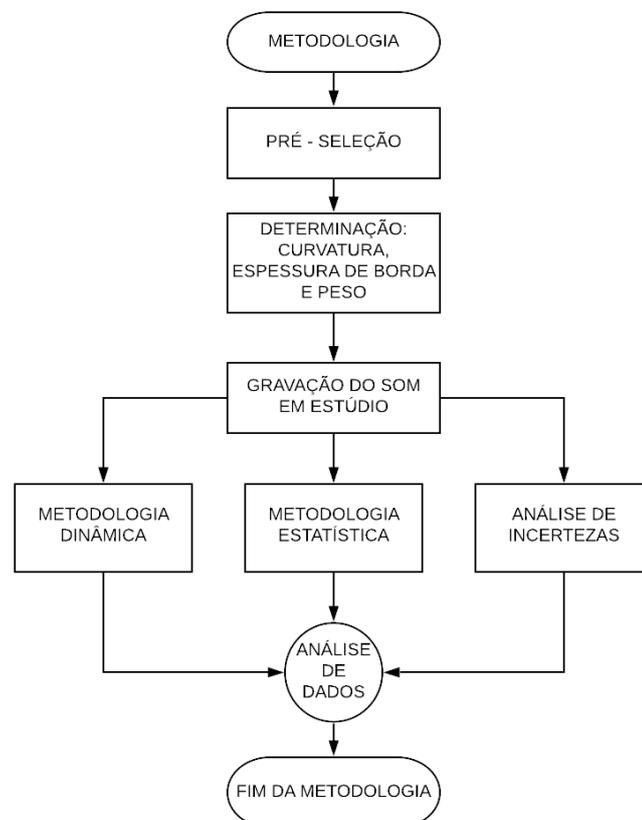


Figura 15 – Fluxograma da metodologia.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Definição das amostras

Uma pré-seleção para uma escolha mais assertiva dos pratos se deu da seguinte forma: buscou-se por pratos do mesmo tipo (*Crash Cymbals*), do mesmo diâmetro (*18 polegadas*) e composições de bronze variadas (*B8, B10 e B20*). Assim sendo, a proximidade entre resultados da medição das curvaturas e espessuras de borda foram os critérios de seleção definitiva estabelecidos.

As curvaturas foram obtidas com o auxílio de um relógio comparador adaptados sobre uma bancada deslizante. Além disso, foram demarcados duzentos e trinta pontos em linha reta ao longo do raio, associados ao momento de leitura do instrumento de medida. Então, por se tratar de um sólido de revolução, estes valores de leitura foram espelhados para que se obtivesse o perfil geométrico total das respectivas amostras.

O funcionamento da bancada se deu da seguinte forma: uma manivela era responsável por girar um parafuso que transferia o movimento angular imposto em movimento linear para uma mesa horizontal em que o prato estava disposto. O relógio comparador ficou fixo em um suporte externo e zerado na borda do prato. Portanto, com o giro da manivela, controlava-se o avanço da mesa de ponto em ponto (de 2 mm em 2 mm) de forma que o relógio comparador sempre estivesse coincidente com o ponto de leitura demarcado.

Para medir a espessura de borda dos pratos, uma metodologia simples foi adotada. Oito pontos distintos e diametralmente opostos foram demarcados sobre o perímetro externo. Então, com a utilização de um paquímetro, as medições de espessuras foram realizadas. Posteriormente, foram tomados os seus respectivos pesos em cinco medidas para cada um, com o auxílio de uma balança com precisão de 1 grama.

3.2 Registro Sonoros

Para a captação do áudio, contou-se com o auxílio do estúdio de gravação *Sonidus* equipado com um microfone *Áudio Technica AT4050*, uma interface universal de áudio *Apollo* e o software *Pro Tools*.



Figura 16 – Foto dos pratos utilizados no ensaio. a) B8. b) B10. c) B20.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, foi montado um suporte de pratos de bateria e um de microfone, de forma que este segundo estivesse ajustado para posicionar o microfone em torno de 30 a 60 centímetros de altura acima do prato, mantendo este ajuste fixo em todo o processo. Em seguida, posicionou-se o prato de liga B8, sobre o suporte e, utilizando uma baqueta de pau marfim com ponta em formato de flecha e peso (42 ± 1) gramas, deu-se o primeiro golpe contra o prato com o “pescoço” da baqueta, esperando o som decair naturalmente até que seu ruído fosse menor que a sensibilidade do microfone. Posteriormente, mais dois golpes foram dados, respeitando-se a mesma regra.

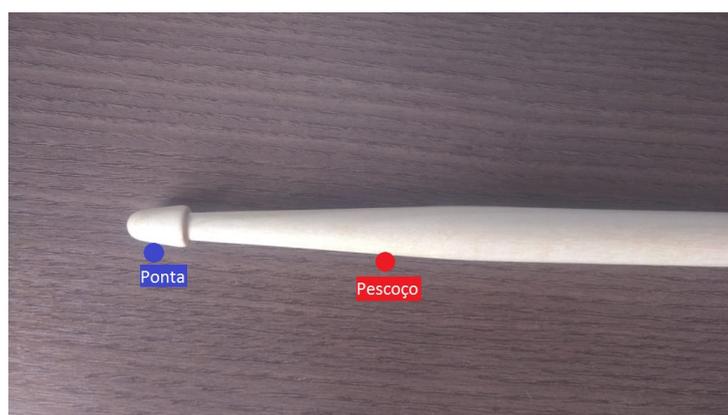


Figura 17 – Foto da baqueta utilizada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalizando estas três captações, substituiu-se o prato de liga B8, pelo de B10. Seguindo a mesma metodologia, esta segunda amostra foi golpeada seis vezes ao todo, sendo as três primeiras com a borboleta e o feltro de amortecimento e as restantes sem. Em seguida, trocou-se o prato B10 pelo B20 e repetiu-se novamente estes procedimentos, obtendo mais seis registros, que assim como para o prato anterior, os três primeiros foram com a borboleta e o feltro de amortecimento e os três seguintes sem.

3.3 Comparação gráfica

A fim de determinar o grau de incerteza envolvido nas análises, optou-se por criar um histograma de número de ocorrência de pico em cada registro de som por faixas de volume. Esse gráfico é responsável por mostrar visualmente como se deu a variação em cada ensaio.

Decidiu-se também por gerar um outro gráfico que mostrasse os valores de máximo e mínimo do volume de cada gravação, dessa forma visualiza-se melhor o grau de diferenças entre os golpes ou os impactos nos pratos durante a gravação. E, complementando este último gráfico, gerou-se um parecido mostrando os quartis superior e inferior, o que nos informa o intervalo em que as famílias de dados podem estar distribuídas, semelhante ao gráfico de caixas.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Embora a classificação do tipo do prato com relação à espessura e peso (*Thin*, *Medium* ou *heavy*) seja fornecida, verificar estes parâmetros se torna válido por se tratar de fabricantes e materiais diferentes. Dessa forma, a Tabela 5 apresenta as amostras utilizadas e a Tabela 6 faz o comparativo entre essas características.

Tabela 5 – Pratos utilizados nos ensaios.

Marca	Série	Bronze	Classificação	Diâmetro (polegadas)
Krest Cymbals	Fusion	B8	Medium Crash	18
N Gate Cymbals	K10 Expression	B10	Medium Crash	18
Zildjian Cymbals	K Dark	B20	Medium Thin Crash	18

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Espessuras de borda e pesos dos pratos utilizados.

Marca	Especificação	Espessura (mm)	Peso (gramas)
Krest	Medium	$1,05 \pm 0,08$	1484 ± 1
N Gate	Medium	$1,2 \pm 0,1$	1523 ± 1
Zildjian	Medium Thin	$0,99 \pm 0,06$	1528 ± 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Era de se esperar que a menor espessura estivesse, de fato, relacionada ao prato de liga B20, por conta de sua especificação *Medium Thin*, isto é, de médio para fino. Com relação aos outros dois pratos (B8 e B10), ambos apresentam a classificação (*Medium*) de espessura, fornecida por seus respectivos fabricantes. Entretanto, houve uma variação significativa na espessura média entre eles, que pode estar relacionada ao afunilamento ou *Taper* no prato de liga B8.

Em relação ao peso, percebe-se que, mesmo tendo a menor espessura, o prato B20 apresentou o maior peso entre as três amostras. Isso indica ser uma consequência do material, uma vez que o estanho apresenta uma massa atômica maior que a do cobre, e a concentração deste primeiro elemento no bronze B20 é superior quando comparado às ligas B8 e B10. Além disso, uma diferença considerável de peso surge entre os pratos de liga monofásica. Pode-se supor que a maior porcentagem de estanho em peso no prato B10 somada a possibilidade do afunilamento da espessura do B8 expliquem essa diferença dos aproximados 40 gramas. Entretanto, como não foi possível medir a espessura ao longo do raio, não se pode afirmar que o afunilamento aconteceu e, portanto, que as diferenças sejam devidas a este fator.

Avaliando os resultados obtidos para a geometria dos perfis, percebe-se uma grande semelhança entre os três pratos, de forma que a maior diferença se encontra na região central a qual é chamada de cúpula.

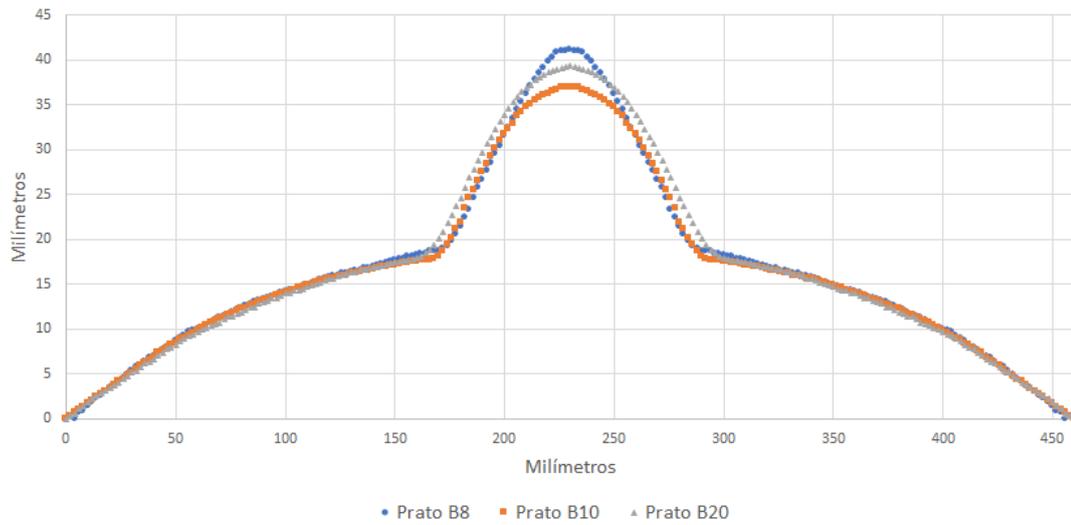


Figura 18 – Curvaturas medidas em laboratório.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro procedimento para análise dinâmica foi realizar a FFT, transpondo para o domínio da frequência os arquivos de áudio de cada gravação dos pratos. Como resultado final, obteve-se três curvas características para cada prato, mostradas na Figura 19, onde cada curva representa a média de todas as transformadas obtidas dos áudios por material. Observando-se estes gráficos, é possível perceber que as maiores ressonâncias encontram-se na faixa de 0 a 1 kHz, mesmo que ainda seja possível perceber diferenças marcantes de oscilações até no entorno dos 5 kHz.

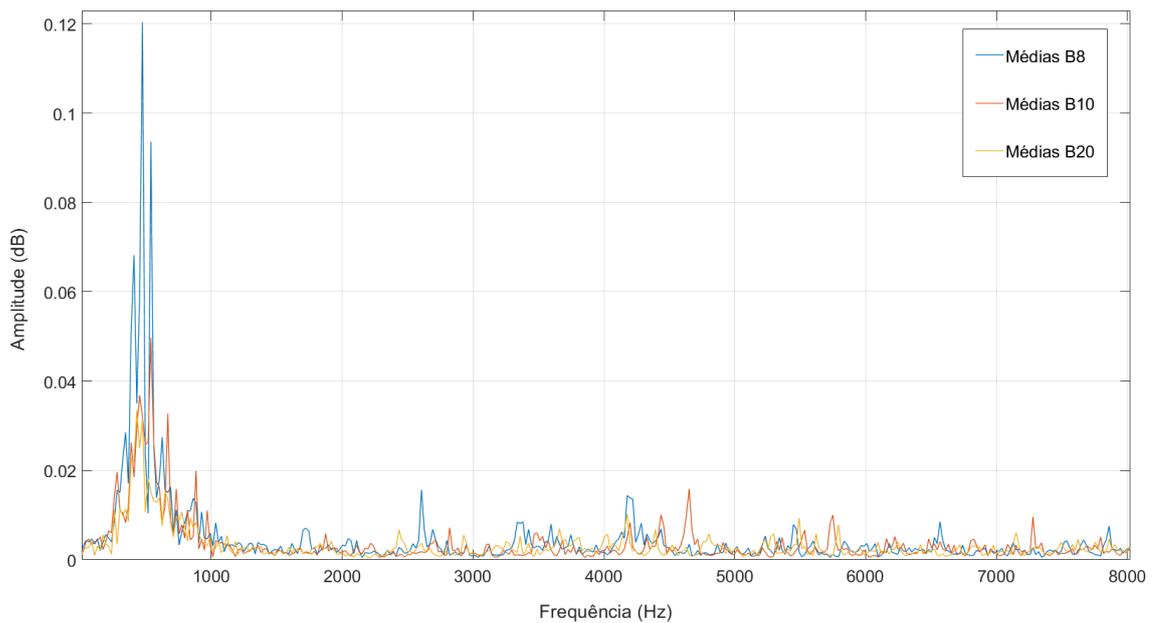


Figura 19 – Transformada Rápida de Fourier.

Fonte: Elaborado pelo autor.

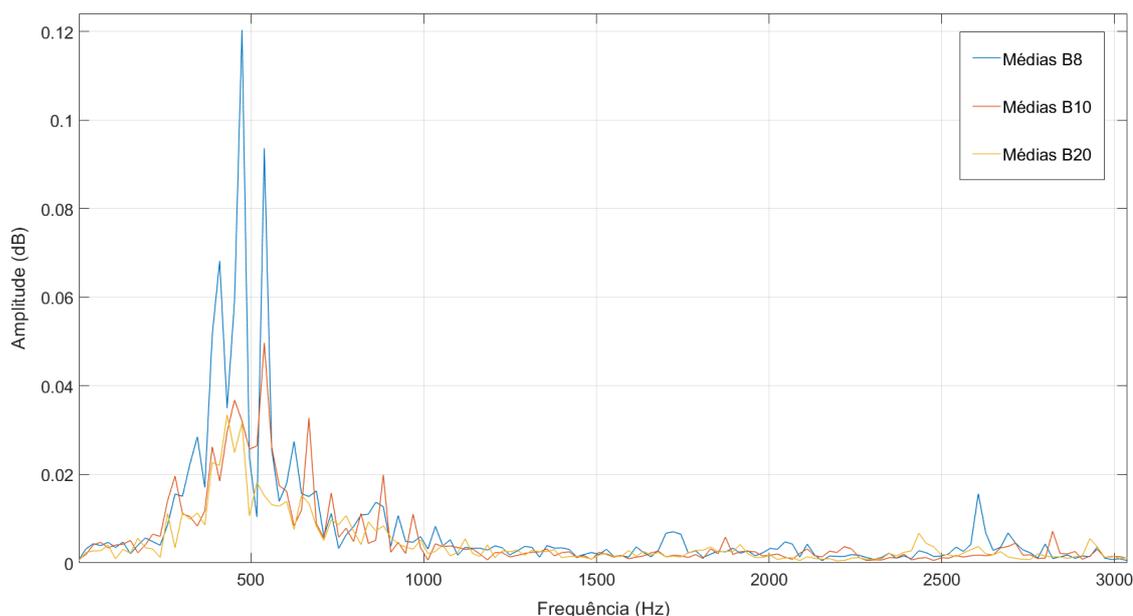


Figura 20 – Transformada Rápida de Fourier em *Zoom*

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por conta disso, uma aproximação visual (*zoom*) até os 3 kHz é feita, para que facilite a análise e a visualização dos dados na parte de maiores variações. É perceptível que as médias de pico foram maiores para o prato B8, seguido do B10 e então B20, dentro desta faixa analisada. Porém, embora haja essa diferença de amplitude, as frequências associadas aos picos são relativamente próximas, o que dificulta a análise dinâmica, ou a caracterização vibracional do material, por este método.

Em seguida, apresenta-se a análise das médias de dez indicadores estatísticos para cada material. Cada IE é representado por três caixas no gráfico, sendo uma para cada prato. Para que seja possível concluir, do ponto de vista probabilístico, que as amostras apresentam sons diferentes, é preciso que não haja sobreposição entre os limites de cada caixa. Assim, como todos os indicadores apresentados não estão na condição desejada para uma análise assertiva, nada pode ser afirmado quanto a eles.

Entretanto, alguns aspectos relacionados à distribuição dos dados podem ser observados. Por exemplo, para o prato B8, todos os indicadores, exceto o fator de crista, possuem um intervalo interquartílico superior aos demais, o que indica uma maior dispersão dos dados, que pode estar associada ao menor número de amostras de som coletadas em estúdio. Outro aspecto que pode ser observado é em relação à média dos valores de pico para cada prato, em que novamente se tem o prato B8 assumindo médias muito maiores que as do B10 e B20, respectivamente. Vale ressaltar que esta observação é referente à média dos valores, pois nada se pode afirmar de forma concreta sobre os parâmetros de modo geral.

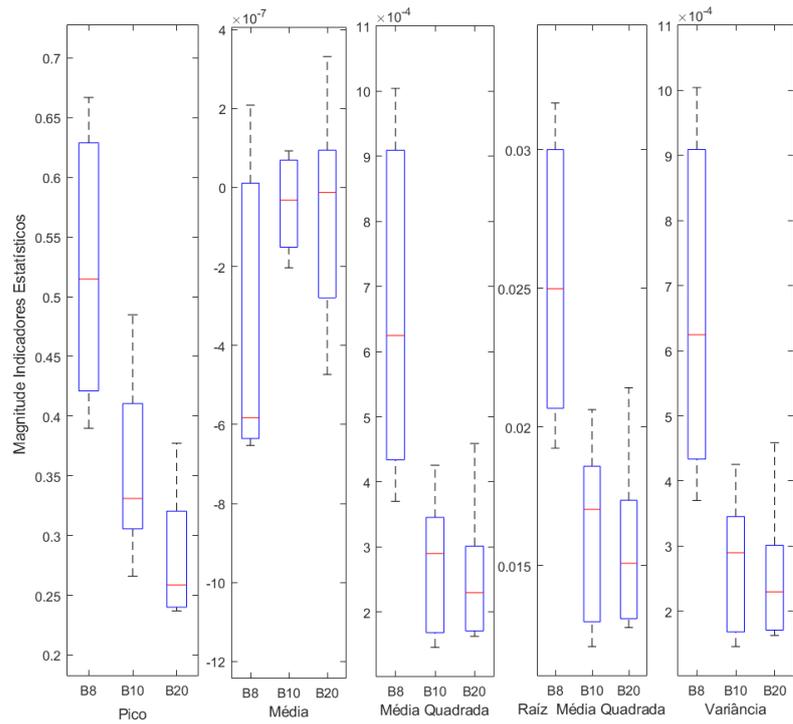


Figura 21 – Gráfico de caixas referente aos indicadores estatísticos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

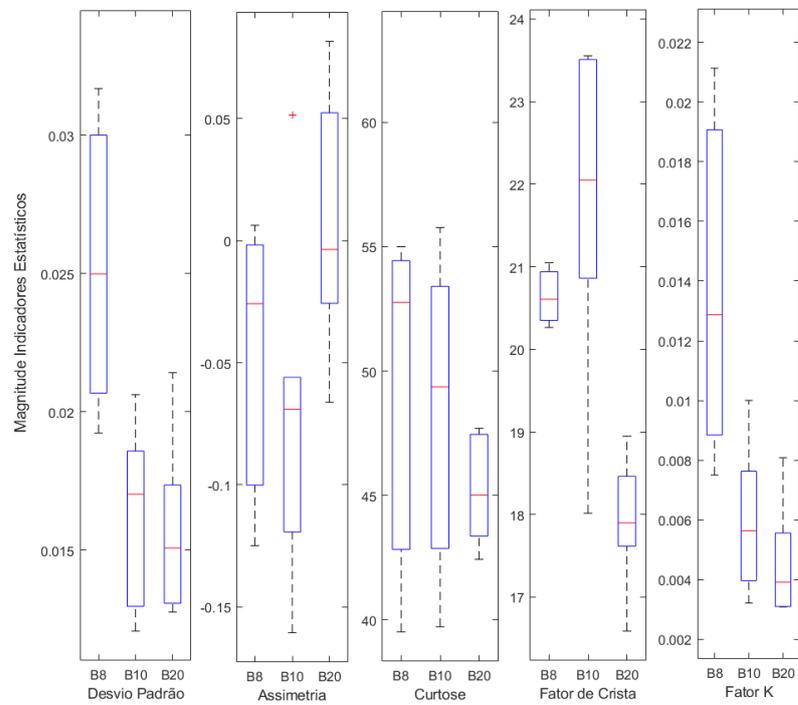


Figura 22 – Gráfico de caixas referente aos indicadores estatísticos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conhecer as incertezas propagadas no caminho durante a metodologia faz-se necessário para que seja possível avaliar se os métodos de análise dinâmica e estatística não se aplicam a este tipo de trabalho ou se alguma variável pode ter dificultado chegar a um resultado mais assertivo. Para isso, gerou-se um histograma contendo o número de ocorrências de pico no eixo das coordenadas pela faixa de volume no eixo das abscissas, de maneira que cada barra é referente à um arquivo de áudio gerado na gravação dos pratos. Dessa forma, é possível enxergar o quão diferente se deu, em cada ensaio, o impacto da baqueta no prato, que se traduz em maior ou menor projeção sonora.

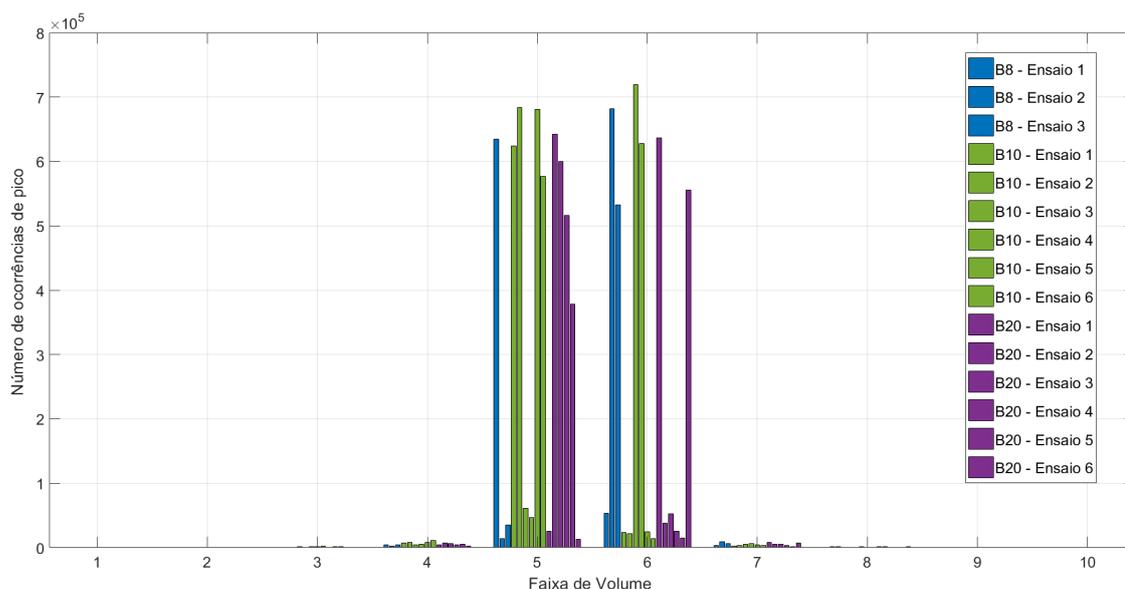


Figura 23 – Histograma do valor de pico por faixa de volume.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à grandes diferenças observadas no histograma (Figura 23), fez-se necessário gerar um gráfico com os maiores e menores valores dos registros de som das amostras por ensaio, e um outro com os valores dos primeiros e terceiros quartis, observados respectivamente pelas Figuras 24 e 25.

Este primeiro realça a diferença entre os valores de máximo e entre os de mínimo volumes para as família de dados. É de interesse que estes valores sejam os mais próximos possíveis entre si em cada agrupamento, entretanto percebem-se oscilações relevantes que se traduzem em grandes incertezas envolvidas no processo de gravação dos áudios. Já o segundo (Figura 25) realça a diferença entre os quartis inferiores e superiores, também dentro de uma mesma família de dados e entre elas. Além disso, é possível observar o intervalo interquartil, que traz informação a respeito da distribuição dos dados. Assim, se o interquartil aumenta, significa que os dados podem estar dispostos em um maior intervalo, ou seja, há uma menor precisão, ao passo que se esse intervalo diminui, a precisão aumenta e os valores convergem para a média.

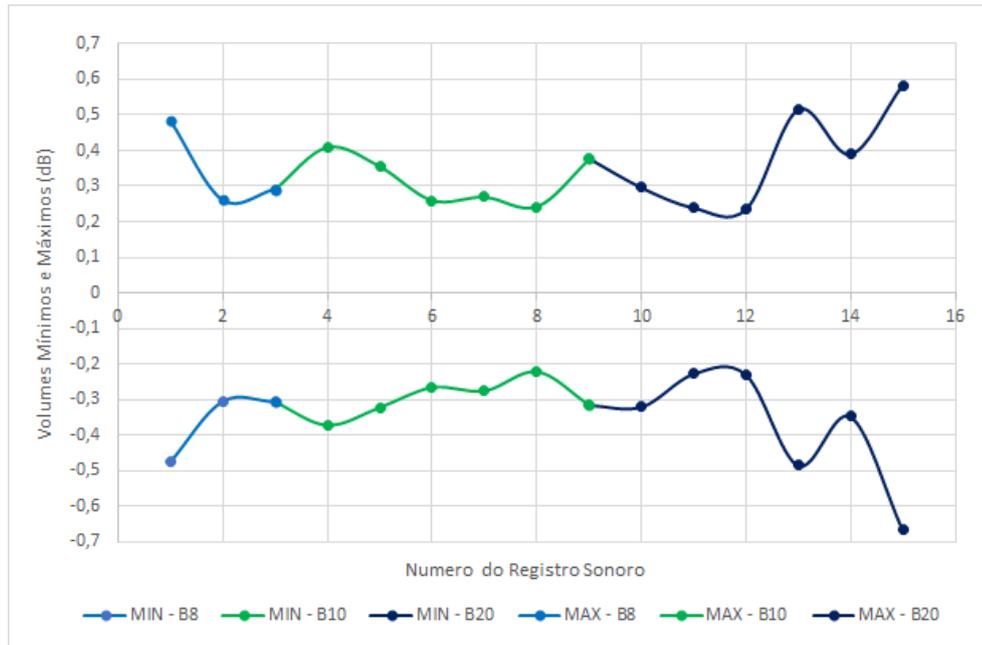


Figura 24 – Maiores e menores valores dos volumes por ensaio.

Fonte: Elaborado pelo autor.

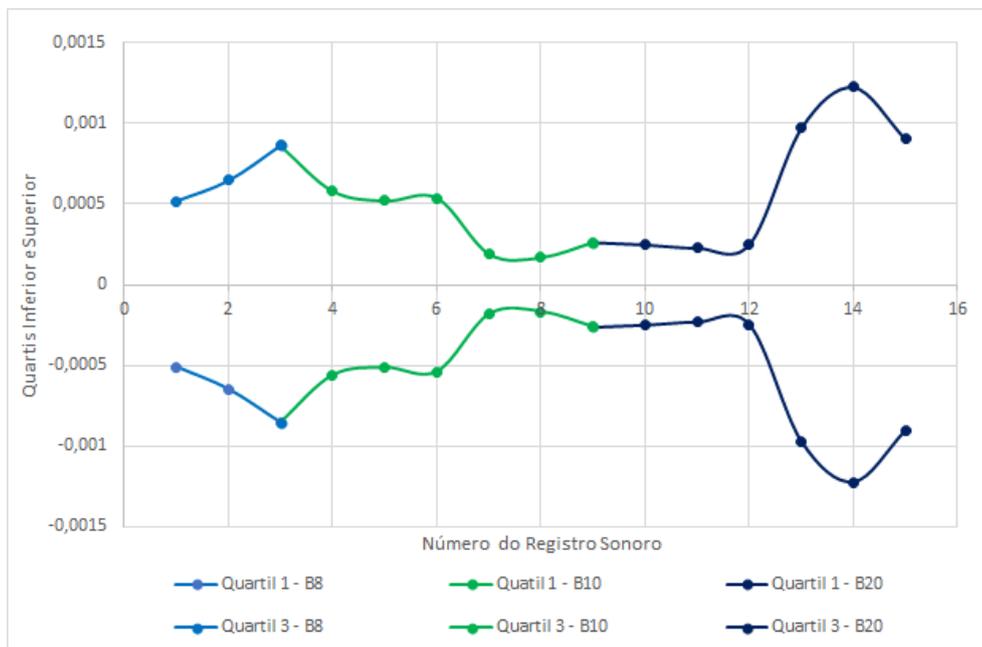


Figura 25 – Primeiros e terceiros quartis dos dados por ensaio.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um exemplo disso é o comportamento do B20 no gráfico da Figura 24, que possui o maior e o menor entre os valores máximos, e o maior e menor valor entre os valores mínimos. Ou seja, as amostras de som ficaram com muita variação entre si. Essa mesma variação pode ser observada também no gráfico da Figura 25 e para o prato B20, notando o momento em que se tem o aumento e a diminuição acentuada dos quartis. Portanto,

isso significa que há muitas incertezas envolvidas nos ensaios e que os mesmos dificultam uma análise mais conclusiva dos dados.

5 CONCLUSÕES

Entender a acústica de pratos de bateria não é algo simples, pois são muitas as variáveis que compõem o seu som final e que se inter-relacionam, podendo uma delas anular ou intensificar o efeito de outra(s). Esse fator aliado aos modos complexos de vibrações lineares e não lineares, dificulta ainda mais o processo.

Com o uso da FFT foi possível detectar que se tratavam de materiais distintos, por conta de algumas diferenças características entre os sinais, tais como os valores máximos de pico e a ocorrência de mais ou menos ressonâncias em frequências posteriores aos picos iniciais.

O uso de Indicadores Estatísticos nos forneceu dez parâmetros de análise para cada material. Embora não tenha sido possível extrair informações conclusivas, por conta da sobreposição de intervalos de coordenadas, algumas observações podem ser feitas, como foi o caso dos maiores intervalos interquartílicos para o prato de liga B8, que mostraram uma menor precisão dos dados. Isto pode estar relacionado ao fato de que se obteve um menor número de registros sonoros desta amostra.

Portanto, do ponto de vista probabilístico, não foi possível discriminar as amostras de materiais, embora isso não invalide o método de IE para este tipo de aplicação, pois, caso se obtenha uma maior número de registros sonoros por material, esta ferramenta poderá apresentar um resultado válido para análise.

Outro ponto importante é com relação aos gráficos das Figuras 23, 24 e 25, que mostram a ocorrência de uma grande variação entre cada ensaio por amostras. Essa variação é decorrente principalmente das diferentes forças de impactos sobre os pratos, do modo como se deu o toque e das distintas configurações de amortecimento (uso e não uso do feltro e da borboleta) durante os registros sonoros para os pratos B10 e para os B20. Dessa forma, é preciso que se tenha uma melhor padronização e maior controle sobre os ensaios, diminuindo as incertezas e, isso juntamente com o aumento do número de amostras físicas e de aquisição dos sons, podem viabilizar os métodos de análise dinâmica utilizados.

Portanto, conclui-se que o uso destas ferramentas analíticas conseguiu mostrar que há diferenças entre as vibrações dos materiais, contudo, devido à complexidade do problema e ao grau de incertezas envolvidos não foi possível caracterizá-las por material.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Este tipo de estudo necessita de um controle de incertezas muito bem definido em todas as etapas de metodologia, além de um número maior de amostras físicas e sonoras. Logo, as limitações deste trabalho junto das considerações feitas se apresentam como

uma oportunidade para trabalhos futuros. Além disso, pode-se pensar na utilização de outros tipos de pratos, como por exemplo, testar estas análises em *rides*, de forma que complemente este estudo.

A aplicação de filtros passa-banda nos espectros sonoros para uma caracterização de amortecimento das amostras, torna-se também um estudo interessante a ser realizado. Essa aplicação pode ir além da utilização de pratos de diferentes ligas, podendo-se ensaiar pratos de diâmetros variados ou até geometrias distintas.

Um comparativo entre dois pratos semelhantes de mesma marca e série, sendo um com avaria e outro sem, pode ser um outro trabalho futuro, a fim de visualizar a influência da mudança da estrutura física no som.

Por fim, explorar o efeito do uso de diferentes tipos de baquetas convencionais nas vibrações dos pratos também é uma sugestão, uma vez que se sabe que o tipo e o formato da ponta, o peso e o tipo de madeira são alguns dos fatores responsáveis por diferentes sons de um mesmo prato, para um mesmo toque.

REFERÊNCIAS

- [1] PINKSTERBOER, H. *The Cymbal book*. Hal Leonard Corporation, 1992.
- [2] BLADES, J. *Percussion instruments and their history*. 5 ed. Westport, CT, USA: The Bold Strummer, Ltd., 2005.
- [3] Werner, K. *Caracterização de aspectos do timbre de pratos de percussão através de análises psicoacústicas*. 2015. 204f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- [4] *Basic Anatomy*. Paiste. Disponível em: <http://www.paiste.com/e/support_anatomy.php>. Acesso em: 17 set. 2019.
- [5] BRENNAN, B. *What You Need to Know About... Cymbal Alloys*. Modern Drummer, 2011. Disponível em: <<https://www.moderndrummer.com/2011/10/what-you-need-to-know-about-cymbal-alloys/>>. Acesso em: 19 set. 2019.
- [6] White, M.; MacMillan, P. (2002). *The Cymbal as an Instructional Device for Materials Education*. MRS Proceedings, 760, JJ1.6.
- [7] MARINHO, E. *Pratos de bateria: segredos, dicas e truques [o guia definitivo]*. Eu Batera, 2016. Disponível em: <<http://eubatera.com.br/pratos-de-bateria/>>. Acesso em: 19 ago. 2019.
- [8] GAZAWAY, M. *The art of cymbal making*. 2018. 32f. Bacharelado em Artes - California State University, Monterey Bay, 2018.
- [9] SCOTT, D. A. *Ancient Metals: Microstructure and Metallurgy: Volume 1, Copper and Copper Alloys*. Los Angeles: Conservation Science Press, 2012.
- [10] MORTAZAVI, M.; OUDBASHI, O. (2010). *Influence of Heat Treatment in Formation of Martensitic Structure in Historical Bronzes*.
- [11] MENDES, M. *Como É Fabricado Um Prato de Bateria*. Youtube, 20 mai. 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=YzDl9XV29Gk>>. Acesso em: 21 ago. 19.
- [12] LAURITSEN, C. *Lathing*. Cymbalutopia. Disponível em: <<http://www.cymbalutopia.com/www.cymbalutopia.com/Lathing.html>>. Acesso em: 19 set. 2019.
- [13] *Anatomy of a cymbal*. Sabian. Disponível em: <<https://sabian.com/en/pages/anatomy-of-a-cymbal>>. Acesso em: 21 ago. 2019
- [14] *Logic Pro X: Attack, Decay, Sustain und Release*. Apple, 2019. Disponível em: <https://support.apple.com/kb/PH27489?locale=de_DE&viewlocale=de_DE>. Acesso em: 17 set. 2019.
- [15] NEYRA-ARAOZ, J. H. *Transformada de Fourier: fundamentos matemáticos, implementação e aplicações musicais*. 2007. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/kon/MAC5900/seminarios/seminario_Jorge.pdf> Acesso em: 24 ago. 2019.

- [16] COCHRAN, W. et al., *What is the fast Fourier transform?*. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, vol. 15, no. 2, pp. 45-55, Junho 1967.
- [17] SMITH, S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 1997. Disponível em: <<http://www.dspguide.com/pdfbook.htm>>. Acesso em: 26 ago. 2019.
- [18] DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. *Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica*. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b4.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2019.
- [19] AMARAL, R.; CURY, A.; BARBOSA, F. (2019). *An SHM approach using machine learning and statistical indicators extracted from raw dynamic measurements*. Latin American Journal of Solids and Structures. 16. 10.1590/1679-78254942.
- [20] *Medição de harmônicas*. Eletricista Consciente. Disponível em: <<http://www.eletricistaconsciente.com.br/wp-content/uploads/2017/04/Medi%C3%A7%C3%A3o-de-Harm%C3%B4nicas.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2019.
- [21] *Boxplot*. Portal Action. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/estatistica-basica/31-boxplot>>. Acesso em: 29 ago. 2019.
- [22] RAMOS, R. *BoxPlot: A Caixa Mágica*. O estatístico, 2017. Disponível em: <<https://oestatistico.com.br/boxplot-a-caixa-magica/>>. Acesso em: 29 ago. 2019.
- [23] Ferreira, J. L. A. *Confiabilidade Estrutural*. Universidade de Brasília. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/12118354/%20-%20confiabilidade%20estrutural%20-%20Jorge%20Luiz>>. Acesso em: 12 set. 2019.
- [24] PETENATI, M. *Box Plot: como analisar e interpretar esse gráfico?*. Escola edti, 2013. Disponível em: <<https://www.escolaedti.com.br/o-que-e-um-box-plot>>. Acesso em: 20 set. 2019.
- [25] VALLADARES NETO, J. ; SANTOS, C. B. ; DE TORRES, E. M. ; ESTRELA, C. *Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos*. ROBRAC (ONLINE) (GOIÂNIA), v. 26, p. 1-6-6, 2017.

ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 30 de Outubro de 2019.

Tales Humberto de Aquino Boratto – Discente
Matrícula: 201465281M – CPF: 126.102.516-45

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.