

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

LUCCAS AUGUSTO PEDRASSANI DELGADO

ANÁLISE DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS EM CORDAS DE GUITARRAS
QUANDO EXCITADAS EM DIFERENTES POSIÇÕES

BENTO GONÇALVES

2022

LUCCAS AUGUSTO PEDRASSANI DELGADO

**ANÁLISE DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS EM CORDAS DE GUITARRAS
QUANDO EXCITADAS EM DIFERENTES POSIÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier

BENTO GONÇALVES

2022

LUCCAS AUGUSTO PEDRASSANI DELGADO

**ANÁLISE DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS EM CORDAS DE GUITARRAS
QUANDO EXCITADAS EM DIFERENTES POSIÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia.

Aprovado em: 01/07/2022

Banca Examinadora

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Vagner Grison
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Tiago Cassol Severo
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais, as pessoas mais importantes da minha vida, que me acompanharam e forneceram suporte durante toda esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Nilton e Maria Lucia, que sempre estiveram presente em todos os momentos da minha vida, sendo a minha base fundamental, não mediram esforços para que tudo fosse feito da melhor forma possível, pelo imenso apoio e por todo amor e carinho durante todo este tempo.

À minha namorada Raíssa, pelo grande companheirismo durante todas as etapas deste trabalho, sendo muito compreensiva e prestativa o tempo todo, facilitando todo esse árduo processo.

Aos meus amigos de longa data, pelos momentos passados, que foram de grande valia ao longo desta caminhada.

Aos amigos que a faculdade me presenteou, como o Rodrigo, Mateus, Giovanni, Guilherme, que foram parceiros durante a graduação.

A todos os professores que de alguma forma fizeram parte da minha trajetória acadêmica, ao meu orientador Paulo Roberto Linzmaier, ao Vagner Grison e Tiago Cassol Severo por participarem da minha banca e avaliarem este trabalho, acrescentando no meu desenvolvimento acadêmico e também como pessoa, e ao Marcelo Dall Onder Michelin pelo auxílio acadêmico e pelas boas conversas durante as aulas.

Ao meu professor de guitarra, Carlos Zanella, por me ensinar a arte de tocar guitarra e ter feito ascender a paixão pelo instrumento, além do auxílio experimental prestado ao longo do trabalho.

Ao luthier Clésio Stanislaski que fez toda a regulagem do instrumento, possibilitando a obtenção dos resultados mais fiéis possíveis, agregando ao trabalho.

RESUMO

A sonoridade do instrumento musical é importante para a música, pois ela consegue modificar a forma que a música é feita e interpretada pelo ouvinte. Para obter uma melhora na sonoridade, o músico usa de alguns artifícios, como efeitos sonoros com o auxílio de equipamento eletrônico. Porém, se tratando da guitarra, há uma forma de alterar a sonoridade das cordas de guitarra de maneira puramente mecânica, por meio da posição onde se excita a corda. O presente trabalho teve como objetivo principal analisar as frequências excitadas em cordas de guitarra, a partir do seu ponto de excitação, por meio de teorias que descrevem o comportamento das cordas, como meio de fundamentar a análise. Esta análise foi executada de forma experimental, consistindo em excitar a corda da guitarra em cinco posições determinadas e, fazendo a captação do som produzido pela corda da guitarra através de uma interface de áudio. Com o auxílio de *softwares*, foi feita a gravação do som proveniente da guitarra, sem modificações, no qual foi transformado o som da guitarra, que estava na forma de onda senoidal, em gráficos de frequências pontuais por intensidades sonoras distintas. Foi analisado cada posição para chegar a conclusão dos fatores que fazem as possíveis alterações nos harmônicos gerados e suas amplitudes. Na análise, foi constatado que para as posições de excitação mais próximas a extremidade obtiveram um aumento na quantidade de harmônicos, que possuem frequências altas, e intensidades maiores. O diâmetro da corda também interfere nas frequências geradas, e na medida que há um incremento no diâmetro da corda, menor é a geração de harmônicos.

Palavras chaves: Vibrações; Guitarra; Cordas; Frequência; Harmônicos.

ABSTRACT

The sound of the musical instrument is important for music, because it can change the way the music is made and interpreted by the listener. To obtain an improvement in the sound, the musician uses some tricks, such as sound effects with the help of electronic equipment. However, when it comes to the guitar, there is a way to change the sound of the guitar strings in a purely mechanical way, by means of the position where the string is plucked. The main objective of the present work was to analyze the excited frequencies in guitar strings, from their point of excitation, by means of theories that describe the behavior of the strings, as a means of substantiating the analysis. This analysis was carried out in an experimental way, consisting in exciting the guitar string in five determined positions and capturing the sound produced by the guitar string through an audio interface. With the help of software, the sound coming from the guitar was recorded, without modifications, in which the guitar sound, that was in the form of a sine wave, was transformed into graphs of point frequencies by different sound intensities. Each position was analyzed to reach a conclusion about the factors that make possible the changes in the generated harmonics and their amplitudes. In the analysis, it was found that for the excitation positions closest to the extremity there was an increase in the amount of harmonics, which have high frequencies, and higher intensities. The string diameter also interferes in the frequencies generated, and as there is an increase in the diameter of the string, less harmonics are generated.

Keywords: Vibration; Guitar; Strings; Frequency; Harmonics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes principais de uma guitarra.....	19
Figura 2 - A construção padrão de um captador magnético	21
Figura 3 - a) Captador <i>single coil</i> na vista transversal ao sentido do comprimento da corda; b) Captador <i>humbucker</i> , em uma vista lateral ao sentido de comprimento da corda.	21
Figura 4 - Tensão induzida no captador <i>humbucker</i> devido a interferência eletromagnética e campo eletromagnético induzido no captador <i>humbucker</i> devido a vibração da corda.	22
Figura 5 - Vibrações de um corpo elástico	24
Figura 6 - Som fundamental e os sons secundários gerados	25
Figura 7 - Formação de um acorde de quinta	26
Figura 8 - Notas musicais de um piano e suas frequências	26
Figura 9 - Numeração internacional das oitavas	27
Figura 10 - Corda de guitarra com enrolamento externo de acabamento redondo.....	29
Figura 11 - Esquema máquina de trefilar com bloco rotativo	30
Figura 12 - A) Visualização de uma corda de aço revestido de estanho com enrolamento de aço revestido de níquel; B) Microscopia de uma corda de guitarra com enrolamento; C) Microscopia de uma corda de guitarra sem enrolamento; D) Microestrutura da seção transversal uma corda com enrolamento, vista com um microscópio.	33
Figura 13 - A vibração de uma corda	34
Figura 14 - Formas modais de uma corda	36
Figura 15 - Análise do tempo de meio ciclo de movimento em uma corda excitada a 1/5 de distância da ponte.	38
Figura 16 - Guitarra e alguns pontos de excitação na região dos captadores.....	38
Figura 17 - Espectro de frequência de uma típica função periódica de tempo.....	40
Figura 18 - Fluxograma	41
Figura 19 - Guitarra Shelter SX PEG3	42
Figura 20 - Tarraxas da guitarra	43
Figura 21 - Ponte fixa <i>tune-o-matic</i>	44
Figura 22 - Tensor da guitarra	45
Figura 23 - Limpeza da escala e trastes.....	45
Figura 24 - Cordas sem enrolamento (fio sólido) e com enrolamento	46
Figura 25 - Jogos de cordas D'Addario XL Nickel Wound	47

Figura 26 - Palheta Jim Dunlop Stubby Jazz.....	48
Figura 27 - Cabo Tecniforte Signature Edu Ardanuy.....	49
Figura 28 - Interface de áudio M-AUDIO Fast Track Ultra.....	50
Figura 29 - Software Reaper.....	51
Figura 30 - ASIO4ALL	51
Figura 31 - Posições de excitação das cordas.....	52
Figura 32 - Configurações do Reaper e ASIO.....	54
Figura 33 - Guitarra posicionada para os testes.....	55
Figura 34 - Afinador ReaTune.....	56
Figura 35 - Nota E ₄ em diferentes cordas da guitarra.....	57
Figura 36 - Acorde de Mi menor	57
Figura 37 - Espectro de frequências do Audacity (esquerda) e Matlab (direita).....	59
Figura 38 - Nota E ₅ , 12 ^a casa, 1 ^a corda, guitarra desregulada	61
Figura 39 - Nota E ₅ , 12 ^a casa, 1 ^a corda, guitarra regulada.....	62
Figura 40 - Espectro de frequências da nota E ₄ em diferentes pontos de excitação.....	64
Figura 41 - Espectro teórico da corda excitada a distância de 1/5 do comprimento total	65
Figura 42 - Espectro de frequência para cordas de diferentes diâmetros, em uma mesma posição	66
Figura 43 - Espectro de frequência para o acorde de E _m	68
Figura 44 - Espectro de frequência da nota E ₄ em 5 diferentes cordas do mesmo jogo.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre as intensidades do Audacity e Matlab	60
Tabela 2 - Harmônicos e suas frequências para $f_0 = 329,63$ Hz (E ₄).....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

r	Razão entre a o intervalo desejado para frequência fundamental inicial fixa
y	Número de semitons de diferença para a frequência inicial fixa
u	Número de oitava(s) acima ou abaixo da frequência fundamental
f_y	Frequência Resultante (Hz)
f_o	Frequência fundamental / inicial (Hz)
P	Força (N)
θ	Deslocamento angular (rad)
f	Frequência linear (Hz)
w	Deflexões transversais (m)
t	Tempo (s)
x	Deslocamento (x)
ρ	Densidade de massa (kg/m ³); Massa por unidade de comprimento (kg/m)
c	Velocidade de onda (m/s)
W	Deflexão transversal (m)
B	Constante avaliada pela condição de contorno
ω	Frequência de oscilação (rad/s)
l	Comprimento (m)
ω_n	Frequência natural (rad/s)
W_n	Valor de W em $t = t_n$ (m)
T_n	Energia cinética da n-ésima massa (J)
C_n	Constante arbitrária, condição de contorno
D_n	Constante arbitrária, condição de contorno
τ_1	Período de oscilação (s)
w_o	Valor de w_o em $t = 0$ (m)
\dot{w}_o	Valor de \dot{w}_o em $t = 0$ (m)

a_0	Coefficiente constante, referente a Série de Fourier
d_0	Diâmetro (m)
ϕ_n	Ângulo de fase no n-ésimo modo (rad)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	A GUITARRA ELÉTRICA	19
2.1.1	Visão Geral.....	19
2.1.2	Estrutura	20
2.1.2.1	Corpo	20
2.1.2.2	Braço.....	20
2.1.3	Captadores.....	21
2.1.4	Ponte.....	22
2.1.5	Pestana	22
2.1.6	Tarraxa	23
2.2	TEORIA MUSICAL.....	23
2.2.1	Ondas sonoras	23
2.2.2	Nota musical.....	23
2.2.3	Série harmônica	24
2.2.4	Formação de acordes.....	25
2.2.5	Frequências notas musicais.....	26
2.2.6	Afinação do instrumento.....	27
2.2.6.1	Justa	27
2.2.6.2	Temperada	28
2.2.6.3	Comparação entre justa e temperada	28
2.3	A CORDA	29
2.3.1	Processo de fabricação	30
2.3.2	Propriedades e características importantes para uma corda.....	31
2.3.2.1	Resistência à tração.....	31

2.3.2.2	Ressonância magnética.....	31
2.3.2.3	Resistência à corrosão.....	31
2.3.2.4	Relaxamento	32
2.3.3	Materiais e microestrutura	32
2.4	VIBRAÇÃO DAS CORDAS	33
2.4.1	Vibração transversal de uma corda	33
2.4.1.1	Equação do movimento	33
2.4.1.2	Vibração livre em uma corda fixa em ambas as extremidades.....	35
2.4.2	Força exercida pela corda	37
2.4.3	O ato de excitar a corda	38
2.4.4	Análise harmônica	39
2.4.4.1	Série de fourier	39
2.4.4.2	Espectro de frequência.....	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	A GUITARRA.....	42
3.2	REGULAGEM DA GUITARRA.....	43
3.3	ESCOLHA DAS CORDAS.....	46
3.4	EQUIPAMENTO PARA GRAVAÇÃO	48
3.5	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA GUITARRA	52
3.6	MÉTODO EXPERIMENTAL	53
3.7	SOFTWARES DE REPRODUÇÃO	58
3.7.1	Comparação entre os softwares.....	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1	REGULAGEM DA GUITARRA.....	61
4.2	FREQUÊNCIAS DE UMA MESMA CORDA PARA UM MESMO PITCH E DIFERENTES PONTOS DE EXCITAÇÃO	62
4.3	FREQUÊNCIAS DE UMA MESMA NOTA MUSICAL EM CORDAS DE DIFERENTES DIÂMETROS.....	66
4.4	FREQUENCIAS DE UM ACORDE EM DIFERENTES PONTOS DE EXCITAÇÃO.....	68

4.5	FREQUÊNCIAS DE UMA MESMA NOTA MUSICAL EM DIFERENTES CORDAS DO MESMO JOGO	69
5	CONCLUSÕES.....	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	APÊNCIDE A – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DAS POSIÇÕES DE EXCITAÇÃO PARA A NOTA E4.....	76
	APÊNDICE B – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS PARA CORDAS DE DIFERENTES JOGOS PARA UMA MESMA POSIÇÃO E AFINAÇÃO	79
	APÊNCIDE C – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS PARA O ACORDE DE EM NAS CINCO DIFERENTES POSIÇÕES DE EXCITAÇÃO	82
	APÊNDICE D – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA NOTA E4 PARA CORDAS DE DIFERENTES DIÂMETROS DO MESMO JOGO	85
	APÊNDICE E – ALGORITMO NO SOFTWARE MATLAB	88

1 INTRODUÇÃO

A indústria musical com o passar dos anos vem sofrendo alterações nas mais diferentes áreas, refletindo diretamente na forma como a música é produzida e entregue ao público, este último mais notável, mudando do formato físico para o formato digital. Uma das áreas que têm influência na indústria musical é a indústria dos instrumentos musicais, não somente pelos equipamentos técnicos e instrumentos que são usados para a produção das músicas, mas também como meio de divulgação das fabricantes dos instrumentos musicais por meio dos músicos que utilizam os mesmos (MACDONALD, 2017).

Uma música é composta pela união de diversas frequências sonoras, na qual cada frequência produzida possui um papel importante na sonoridade e na harmonia da música. Cada instrumento musical detém seu conjunto de frequências que o difere dos demais. A guitarra, em especial, em razão de sua natureza, é possível a sua utilização com êxito na maioria das músicas e composições, além de ser um instrumento que vem sendo usado como meio de ensino sobre teoria musical nas universidades.

Em virtude disso, a sonoridade e o timbre da guitarra podem variar por diversos fatores, uma parte desses são ligados diretamente aos captadores e efeitos sonoros como distorção, compressão, *delay* e *reverb*, estes dependentes de processos físicos-elétricos. As cordas da guitarra, por sua vez, têm sua mudança de sonoridade e do timbre alterando a sua posição de excitação e também com a alteração no diâmetro da corda, possuindo uma ligação com fenômenos de origem puramente mecânica.

Os músicos têm uma percepção de variáveis que alteram o timbre do instrumento, como o caso da mudança da posição de excitação das cordas. Com o avanço da tecnologia atual, as possibilidades de se fazer uma análise mais profunda são incrementadas, e conseqüentemente, é possível averiguar estas mudanças por um ponto de vista de engenharia, com o auxílio de teorias e equações que descrevem a corda da guitarra e suas interações vibracionais com o meio.

1.1 JUSTIFICATIVA

Dentro do cenário musical existe a busca por uma identidade musical, a qual distingue um músico do outro, independente do seu gênero musical. Uma das formas que existem para desenvolver uma identidade musical é através da característica sonora, seja vocal ou instrumental (MACDONALD, 2017).

A característica sonora depende de inúmeros fatores. É interessante analisar individualmente o que cada fator altera o som. No caso das cordas de uma guitarra em específico, um desses fatores é o material da corda. Segundo Padilha (2000), o estudo dos materiais cresce ao longo dos anos, trazendo como resultados explicações e conclusões que antes não eram visíveis, fruto da aplicação do conhecimento provindo da engenharia e da busca por respostas. Isto é importante em um todo, não somente na aplicação específica das cordas de guitarras, por conta da qualidade destes materiais ser melhorada nos mais variados aspectos como sua durabilidade, microestrutura, qualidade superficial, resistência à corrosão, resistência à tensão, entre outros.

Outro fator que altera o som da guitarra é o processo de fabricação dos arames utilizados em cordas de guitarras, pois define a sua espessura e a sua microestrutura final. O estudo mais detalhado deste processo incrementa a qualidade do produto resultante.

Todavia, estas alterações da sonoridade da corda não dependem somente da corda em si, mas da forma que ela é posta à vibração e como ela vibra, um processo que tem origem puramente mecânica. Assim, neste presente trabalho serão analisadas as frequências excitadas de cordas de uma guitarra, variando a sua posição onde foi excitada. O objetivo é compreender os fenômenos que fazem essa alteração na sonoridade nas cordas pelo método do experimento prático, baseado em teorias da engenharia que descrevem a corda, de modo a verificar essas alterações, as quais no final poderão beneficiar o músico em sua composição e na sua forma de tocar, sendo uma alternativa a mais na busca pela identidade musical para qual o músico almeja.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o espectro de frequências produzidas por cordas de guitarra a partir de diferentes pontos de excitação.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Aferir as distinções nas frequências encontradas para uma única corda apenas mudando o ponto de excitação.
- b) Analisar as frequências resultantes provenientes da excitação de cordas com diâmetros diferentes, em uma mesma afinação e frequência da nota.
- c) Verificar as alterações das frequências para uma mesma nota musical em diferentes cordas do mesmo jogo
- d) Relatar a variação das frequências que compõem um acorde para pontos de excitação distintos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os componentes, conceitos e equações que descrevem a guitarra elétrica e as vibrações mecânicas por ela produzidas.

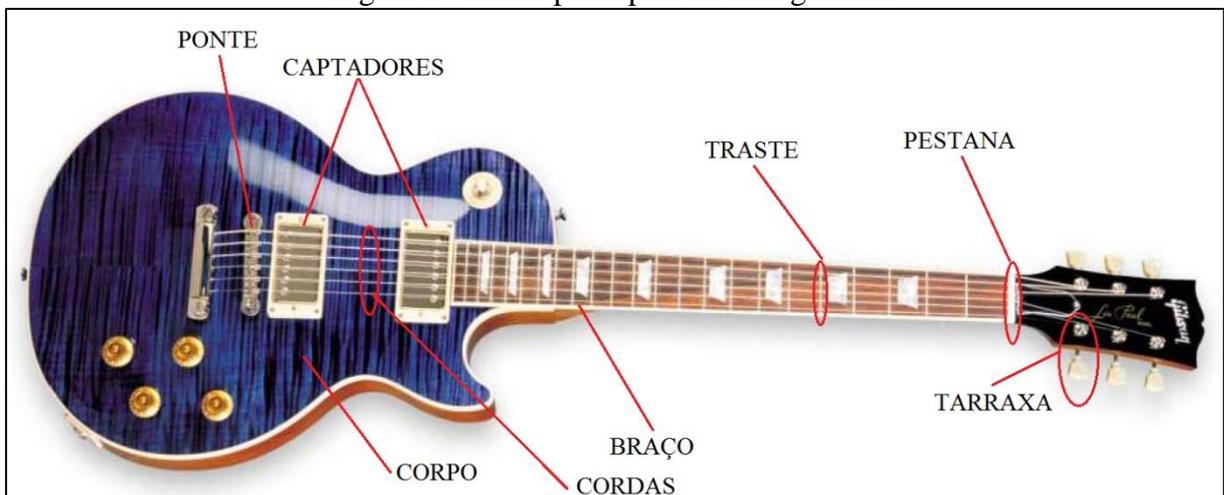
2.1 A GUITARRA ELÉTRICA

2.1.1 Visão Geral

Segundo Rossing (2010), a primeira aparição da guitarra elétrica foi em 1923 desenvolvida por Lloyd Loar, cujo meio de captação era por um microfone de carbono modificado e não obteve sucesso. Então somente em 1934 Beauchamp patenteou o primeiro modelo de guitarra elétrica chamado de “*Frying Pan*”, com um captador de bobina simples, com imã proveniente de ferraduras de cavalo, com enrolamento em seis polos que sentiam a mudança do fluxo magnético à medida que as cordas metálicas vibravam.

Nos anos seguintes houveram invenções significativas que impactaram diretamente no destino da guitarra, como o captador do tipo *single coil* criado por Walter Fuller em 1935, da primeira guitarra com o corpo sólido em 1946, desenvolvida pela Gibson, a qual também em 1957 criou o captador do tipo *humbucker*, este desenvolvido para eliminar os ruídos produzidos pelo captador do tipo *single coil* (ROSSING, 2010). Na Figura 1, pode ser visualizada uma guitarra Gibson modelo Les Paul, tendo suas partes principais importantes para este trabalho, grifadas.

Figura 1 - Partes principais de uma guitarra



Fonte: Adaptado de Gibson (2018).

2.1.2 Estrutura

2.1.2.1 Corpo

Em instrumentos musicais de cordas, são comumente utilizados vários tipos de metais, madeiras e mais recentemente materiais compósitos. Cada material terá suas características mecânicas, sendo que algumas dessas podem ser medidas e descritas, auxiliando a busca pelo material mais compatível com a aplicação (BUCUR, 2016).

Guitarras elétricas geralmente possuem o corpo sólido ou oco. As vibrações que acontecem no corpo da guitarra não detêm tanta relevância como em um violão, em virtude das cordas da guitarra transferirem pouca energia para o corpo da guitarra. O corpo sólido da guitarra é pouco suscetível a ter retorno acústico do som, quando comparado com um violão ou uma guitarra de corpo oco (FLETCHER, 1991).

Gore (2011) afirma que a madeira é o material mais utilizado em corpos de guitarras e violões, por causa das suas características apropriadas para este instrumento. Algumas propriedades importantes desse material são: módulo young; densidade; estabilidade estrutural com a variação da umidade; flexibilidade em função do calor e a dureza.

Não há problema em utilizar madeiras de diferentes espécies, porém cada madeira possui uma densidade e um coeficiente dimensional, caso eles tenham muita distinção, podem causar forças de distorção que incidem na estrutura da madeira (GORE, 2011).

2.1.2.2 Braço

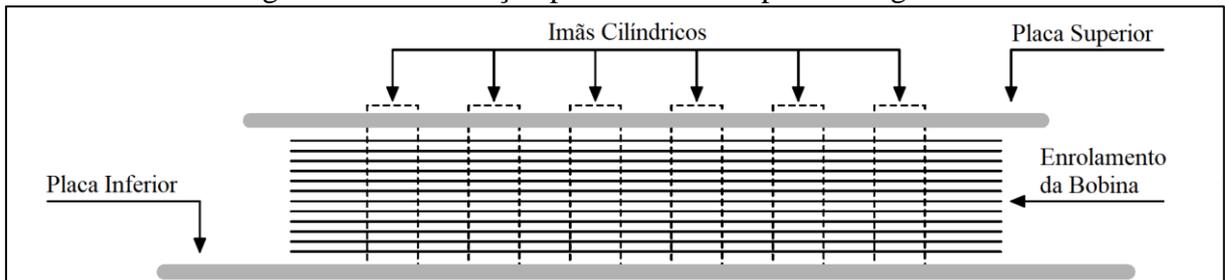
É uma longa e delgada parte estrutural que sofre compressão axial e flexão por causa da tensão das cordas. À medida que o diâmetro das cordas utilizadas aumenta, maior será a massa total das cordas, e conseqüentemente a tensão gerada por elas, necessitando que o braço da guitarra possua uma maior resistência à compressão e à flexão. Além disso, são acoplados nele outras partes fundamentais da guitarra como tarraxas, trastes e a pestana (GORE, 2011).

De acordo com Stanciu (2014), para aumentar a rigidez do braço e evitar deformações, insere-se uma vareta feita de um material com elevada dureza (madeira dura, metal, fibra de carbono), em que é possível ajustar a tensão exercida nesta vareta por um sistema rosqueado. Este ajuste de tensão é importante não só para controlar a deformação do braço, mas também para executar uma regulagem mais refinada na afinação do instrumento, em razão de mudar o comprimento do braço.

2.1.3 Captadores

Existem vários tipos de captadores, como o acústico, magnético e o piezoelétrico, os quais se diferem em seu princípio de funcionamento, sendo o magnético o mais utilizado. Como pode ser visto na Figura 2, o captador magnético consiste de um ímã permanente, enrolado inúmeras vezes por um fio metálico, criando uma bobina (HORTON, 2009).

Figura 2 - A construção padrão de um captador magnético

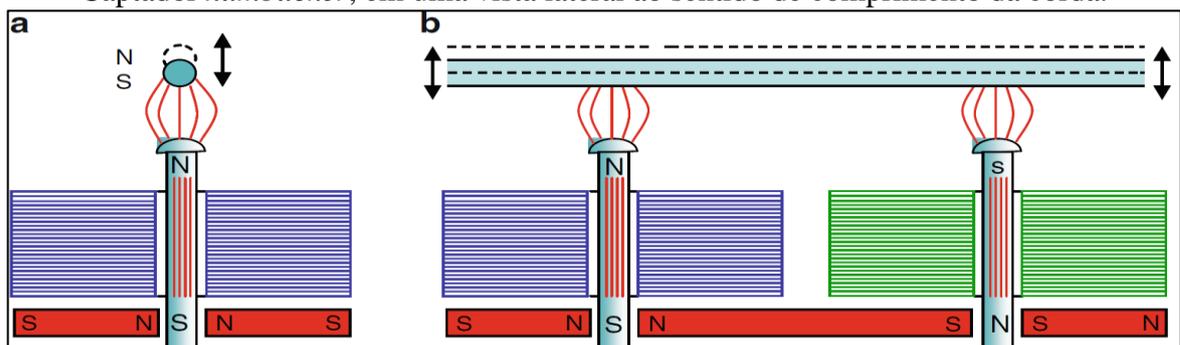


Fonte: Adaptado de Lahdevaara (2014).

O captador magnético funciona pela vibração da corda de metal excitada perto de uma extremidade do ímã. Esta vibração altera a quantidade do fluxo magnético que passa pelo ímã, gerando um valor de tensão no enrolamento da bobina, que será amplificada e filtrada. Esta tensão induzida é proporcional à velocidade vertical da corda excitada, considerando que a corda esteja posicionada exatamente em cima do polo. Caso o movimento da corda tenha sentido transversal, a intensidade da tensão será menor, independente se a corda mover para a direita ou esquerda (ROSSING, 2010).

De acordo com Lahdevaara (2014), existem dois tipos de enrolamento: *single coil* e o *humbucker*. Enquanto o captador do tipo *single coil* dispõe de apenas uma bobina, o *humbucker* possui duas bobinas, como demonstrado na Figura 3.

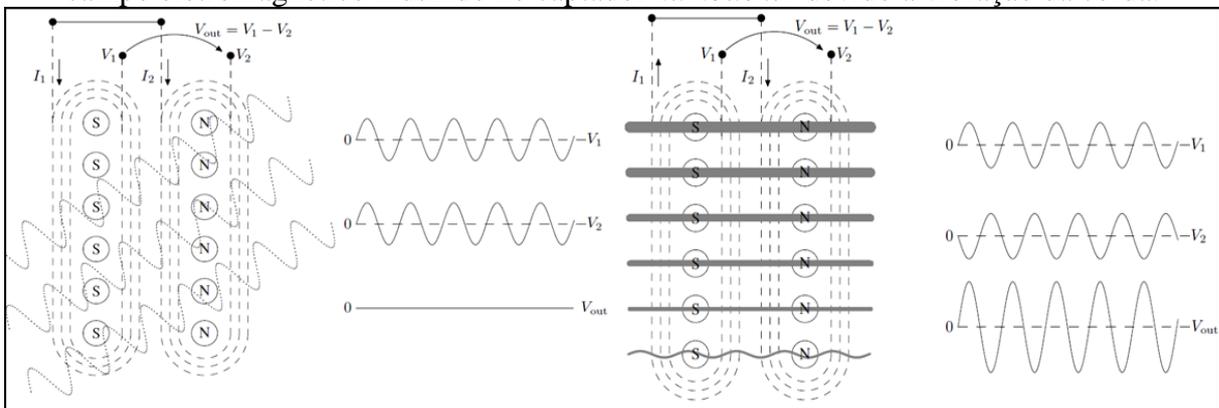
Figura 3 - a) Captador *single coil* na vista transversal ao sentido do comprimento da corda; b) Captador *humbucker*, em uma vista lateral ao sentido de comprimento da corda.



Fonte: Rossing (2010).

Uma das consequências de utilizar captadores *single coil*, é um ruído “*hum*” causado pelo próprio campo magnético gerado pela bobina, o qual oscila na mesma frequência da rede elétrica, ruído este inevitável, pois a guitarra necessita de energia para funcionar. Já o captador *humbucker* consiste em duas bobinas de polos opostos, na qual a tensão induzida gerada pela interferência eletromagnética é igual para os dois polos. Portanto os polos são conectados em série para que o valor dessa tensão resultante seja zero, não gerando este ruído “*hum*”. Outra vantagem deste modelo de captador é em virtude do seu valor de tensão de saída ser mais alto que o *single coil*, por conseguinte, a intensidade sonora captada pelo movimento das cordas é maior, ilustrado pela Figura 4 (LAHDEVAARA, 2014).

Figura 4 - Tensão induzida no captador *humbucker* devido a interferência eletromagnética e campo eletromagnético induzido no captador *humbucker* devido a vibração da corda.



Fonte: Lahdevaara (2014).

2.1.4 Ponte

A função é apoiar as cordas para que elas possam vibrar livremente. A do tipo fixa mantém a corda fixa e não permite nenhuma alteração no *pitch*. Já a do tipo tremolo consegue gerar uma alteração do *pitch* da nota, devido ao guitarrista exercer uma força na alavanca da ponte tremolo, movendo o ângulo da ponte para mais ou menos em relação à posição de repouso, fato que aumenta ou diminui a tensão das cordas (KEMP, 2017).

2.1.5 Pestana

Sua função é apoiar as cordas na extremidade oposta à ponte, permitindo que ela consiga vibrar. O tipo convencional de pestana faz com que exista um baixo escorregamento da corda em relação a pestana à medida que se aumenta a tensão da corda. Já a tarraxa com trava elimina esse problema, pois prende a corda por meio de uma chapa que é parafusada até que ocorra o

travamento da corda. Este sistema de tarraxa é utilizado em pontes do tipo tremolo (KEMP, 2017).

2.1.6 Tarraxa

Conhecidas como *tuning peg*, as tarraxas têm a função de segurar a corda enrolada em seu próprio corpo a qual é introduzida por um orifício na tarraxa, aumentando ou diminuindo a tensão da corda de guitarra pelo movimento de rotação da tarraxa (POLAK, 2018).

2.2 TEORIA MUSICAL

2.2.1 Ondas sonoras

O ingrediente principal de uma música é o som, que é a sensação produzida no ouvido ocasionado por vibrações de corpos elásticos. Qualquer vibração desloca o ar na forma de ondas sonoras, propagando-se em todas as coordenadas ao mesmo tempo, atingindo a membrana do tímpano, fazendo-a vibrar. As vibrações então são convertidas em impulsos nervosos e transmitidas ao cérebro, que as identifica e as decodifica (MED, 1996).

As frequências que o ouvido humano consegue detectar variam de 20 Hz até 20 kHz, sendo que a sensibilidade tem uma queda em frequências menores que 100 Hz ou maiores que 10 kHz. Essa frequência de resposta é compatível com a da fala humana, que em sua maioria rege entre 300 Hz e 3 kHz (FLETCHER, 1991).

2.2.2 Nota musical

Na música existem dois tipos de vibração, as vibrações regulares e vibrações irregulares. As vibrações regulares produzem sons com um *pitch* definido, por outro lado as vibrações irregulares produzem sons cujo *pitch* é indefinido, vibrações essas conhecidas como barulhos ou ruídos. Em uma música podem ser utilizados sons regulares, correspondendo a instrumentos com notas definidas, e tanto quanto sons irregulares, como instrumentos de percussão. (MED, 1996).

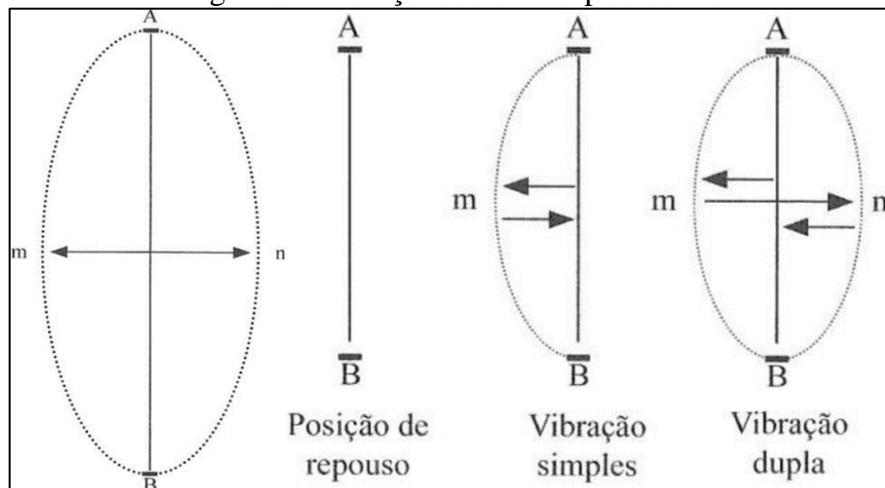
Para Med (1996), uma nota musical é composta por quatro características: duração, intensidade, timbre e *pitch* (altura).

- A duração também chamada de extensão de um som é o tempo que ela vibra e pode ser captada pelo ouvido;
- A intensidade de uma nota é dada pela amplitude da onda, quanto maior a amplitude desta onda maior será a intensidade sonora, conseqüentemente maior a pressão sonora exercida no ouvido. A intensidade do som é chamada de decibel (dB);
- O timbre é a característica sonora de determinada nota musical, diferenciada pelo formato da onda, por ser uma combinação de frequências;
- O *pitch*, também conhecido como altura do som. É o termo dado para a frequência exata de uma nota musical, independente de sua intensidade, timbre ou duração. A medida que se aumenta a frequência, ou velocidade da vibração, mais agudo será o som. A unidade da frequência por segundo é hertz (Hz);

2.2.3 Série harmônica

Um corpo elástico ao originar um som, sai de seu ponto de repouso e é transposto ao ponto AmB, e ao soltar a corda, ela retorna ao seu ponto inicial, resultado da sua natureza elástica. Todavia, foi gerada uma tensão nessa corda e por isso ela não consegue finalizar seu movimento no seu ponto de repouso, continuando o movimento ao lado oposto AnB, retornando para AmB na sequência. Esse movimento repetitivo se estende até que corda vá perdendo gradativamente sua tensão, descansando na sua posição de repouso, como mostra a Figura 5 (MED, 1996).

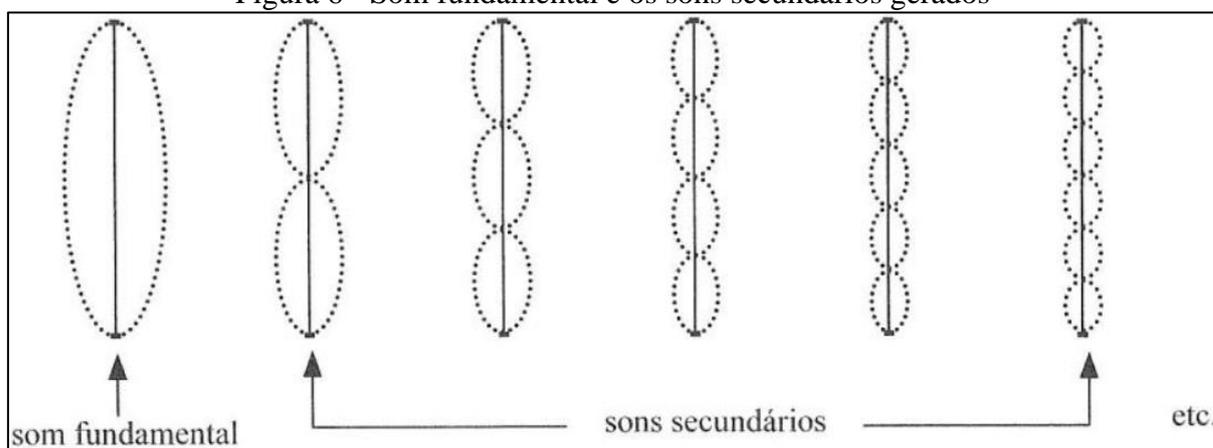
Figura 5 - Vibrações de um corpo elástico



Fonte: Med (1996).

O som produzido por instrumentos musicais não é composto somente de uma nota. Em conjunto com o som principal, ressonam sons secundários. O som principal é denominado som fundamental e possui a frequência fundamental da nota tocada, enquanto os sons secundários são chamados de sons harmônicos. A vibração gerada pela corda gera vibrações que se dividem em duas metades, em terços, quartos, quintos, até o infinito, porém à medida que aumentam a quantidade de harmônicos, a intensidade sonora diminui e assim somente uma parte desses harmônicos podem ser ouvidos, segundo a Figura 6 (MED, 1996).

Figura 6 - Som fundamental e os sons secundários gerados



Fonte: Med (1996).

2.2.4 Formação de acordes

De acordo com Miller (2005), um acorde é uma combinação de três ou mais notas diferentes que soam ao mesmo tempo. O relacionamento entre essas notas é um fator primordial para a sonoridade tanto do acorde, como do contexto musical no qual ele está inserido.

A nota que tem a menor altura do acorde (mais grave) em sua posição original é denominada de fundamental, sendo que as outras notas possuem o nome do intervalo que se formam com a fundamental. A fundamental é a nota mais importante do acorde, pois ela é a nota que dá origem ao acorde (MED, 1996).

Uma forma de definir o acorde é através do intervalo que existe entre as notas extremas, em que as quatro formas de acordes são designadas de quinta, sétima, nona e décima primeira, cada uma com três, quatro, cinco e seis notas, respectivamente. Os acordes de quinta são os mais comuns e fáceis de formar, visualizado na Figura 7 (MED, 1996).

$$f_y = 2^u \cdot f_o \quad (1)$$

Onde:

f_o = frequência fundamental / inicial (Hz)

f_y = frequência resultante (Hz)

u = número de oitava(s) acima ou abaixo da frequência fundamental



Fonte: Med (1996).

2.2.6 Afinação do instrumento

Ao longo dos anos vários tipos de determinações das frequências específicas de cada nota foram feitos, e são essenciais para a sonoridade e combinações de frequências dos instrumentos (GUNTHER, 2019).

2.2.6.1 Justa

Este tipo de afinação determina uma prioridade da divisão integral entre a frequência de dois intervalos musicais (GUNTHER, 2019).

Isto ocorre naturalmente em função de um fenômeno explicado pela série harmônica. Dentre as desvantagens, esta afinação muda de acordo com a escala utilizada, geralmente usada

em concertos musicais em que os músicos conseguem acertar o *pitch* “pelo ouvido” (SUITS, 1998).

Os intervalos musicais da afinação justa possuem uma sonoridade rica e agradável, porém, matematicamente, se torna impossível criar músicas por completas com apenas os intervalos entre todos os pares de notas significativas. Por este motivo, houve a necessidade de se criar um novo sistema de afinação: a equivalente temperada (GUNTHER, 2019).

2.2.6.2 Temperada

Este tipo de afinação tem a oitava dividida igualmente em doze semitons, representando o afastamento da afinação perfeita contida no sistema natural em detrimento da utilização do sistema cromático, abandonando aos cálculos físicos e à acústica pura para facilitar as projeções harmônicas. (MED, 1996).

Ela foi desenvolvida primariamente para instrumentos de tecla, porém atualmente é utilizada em grandes variedades de instrumentos musicais, sendo que seus intervalos musicais são os mesmos em qualquer escala musical, mantendo constante as frequências entre as notas (SUITS, 1998).

$$r^{12} = 2 \quad (2)$$

$$r = 2^{\left(\frac{y}{12}\right)} \quad (3)$$

$$f_y = 2^{\left(\frac{y}{12}\right)} \cdot f_o \quad (4)$$

Onde:

r = razão entre a o intervalo desejado para frequência fundamental inicial fixa

f_o = frequência fundamental / inicial (Hz)

f_y = frequência resultante (Hz)

y = número de semitons de diferença para a frequência inicial fixa

2.2.6.3 Comparação entre justa e temperada

O Quadro 1 demonstra a relação das frequências para cada intervalo em relação à fundamental. (SUITS, 1998).

Quadro 1 - Comparação das afinações para cada intervalo musical

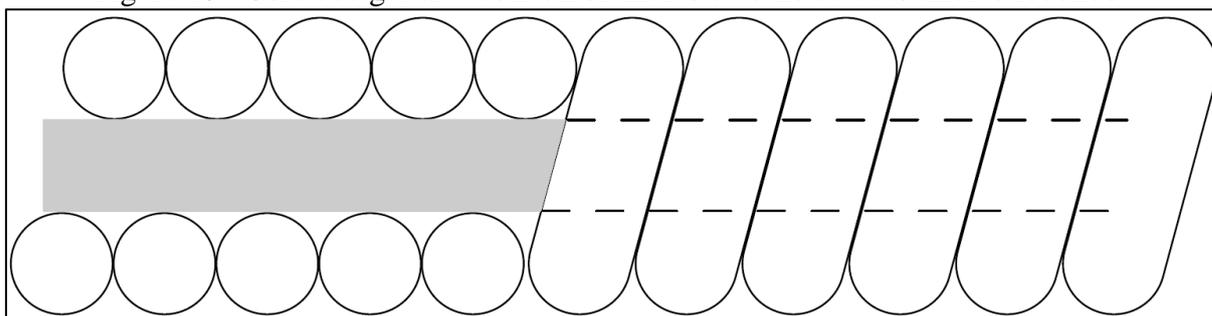
Intervalo	Relação para a Fundamental - Justa	Relação para a Fundamental - Temperada
Fundamental	1.00000	$2^{0/12} = 1.00000$
Semitom	$16/15 = 1.06667$	$2^{1/12} = 1.05946$
Tom	$9/8 = 1.12500$	$2^{2/12} = 1.12246$
Terça menor	$6/5 = 1.20000$	$2^{3/12} = 1.18921$
Terça maior	$5/4 = 1.25000$	$2^{4/12} = 1.25992$
Quarta	$4/3 = 1.33333$	$2^{5/12} = 1.33483$
Quinta diminuta	$45/32 = 1.40625$	$2^{6/12} = 1.41421$
Quinta	$3/2 = 1.50000$	$2^{7/12} = 1.49831$
Sexta menor	$8/5 = 1.60000$	$2^{8/12} = 1.58740$
Sexta maior	$5/3 = 1.66667$	$2^{9/12} = 1.68179$
Sétima menor	$9/5 = 1.80000$	$2^{10/12} = 1.78180$
Sétima maior	$15/8 = 1.87500$	$2^{11/12} = 1.88775$
Oitava	2.0000	$2^{12/12} = 2.00000$

Fonte: Adaptado de Suits (1998).

2.3 A CORDA

Uma corda de guitarra é um dos sistemas vibratórios mais simples do mundo, cujas equações de ondas unidimensionais podem ser derivadas e aplicadas a uma corda de guitarra que sofre deflexão. Ela pode ser construída na forma de um fio sólido ou também na forma de um fio sólido com um enrolamento em torno do fio. Fios sólidos não possuem descontinuidades em sua seção, e devido a sua natureza, são utilizados para as cordas menos espessas. Já as cordas que possuem o enrolamento, são utilizadas em diâmetros mais grossos. O fio interno de uma corda que possui enrolamento tem formato hexagonal para que o enrolamento possa fixar-se melhor no fio. A função do enrolamento é aumentar levemente a massa da corda sem aumentar desproporcionalmente a rigidez da corda, exemplificado pela Figura 10. As cordas podem ter diferentes diâmetros dependendo da posição utilizada no instrumento, e também diferentes materiais empregados tanto no arame quanto no enrolamento. (LAHDEVAARA, 2014).

Figura 10 - Corda de guitarra com enrolamento externo de acabamento redondo.



Fonte: (Lahdevaara, 2014)

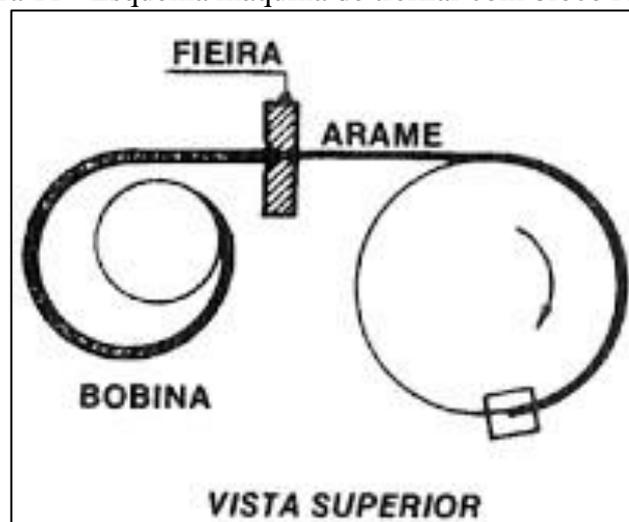
2.3.1 Processo de fabricação

O processo de trefilação é basicamente forçar uma barra por meio de uma fieira conforme se aplica uma força de tração à saída desta fieira. A barra é posicionada e introduzida através da fieira posteriormente presa por garras de tração, geralmente conduzidas por uma corrente sem fim, como pode ser visto na Figura 11. Essas fieiras podem ser construídas de carboneto de tungstênio, material que confere uma grande durabilidade a ela. Além disso, são discriminadas pelo seu diâmetro de entrada, diâmetro de saída e o ângulo de trefilação (HELMAN, 2005).

Segundo Helman (2005), o material é deformado conforme passa pela fieira, na qual essa deformação causa uma redução no diâmetro e conseqüentemente na área de seção transversal, por conseguinte, o comprimento do arame aumenta. Outra característica de um arame trefilado é a boa qualidade superficial e excelentes tolerâncias dimensionais.

De acordo com Shaeffer (2004) existem vários tipos de tratamento térmico que podem ser aplicados ao arame dependendo da necessidade e aplicação, como a têmpera, revenimento, patenteamento e o mais importante, o recozimento. Esse último tem o propósito de eliminar o encruamento provocado pela deformação a frio do material. A redução da área é trazida a certo ponto no qual a resistência ao escoamento aumenta de uma forma que o material não se deixa mais deformar e rompa. O processo de recozimento pode levar a um alívio de tensões internas do material como também a uma recristalização do material, isto é, o surgimento de uma nova microestrutura, com o surgimento e crescimento de novos tipos de grão.

Figura 11 - Esquema máquina de trefilar com bloco rotativo



Fonte: Adaptado de Helman (2005).

2.3.2 Propriedades e características importantes para uma corda

2.3.2.1 Resistência à tração

Quando se aplica uma força em um material contínuo em uma área que é perpendicular a essa força, o quociente dessa força sobre a área tenderá a um limite finito, que é chamado de tensão. Se essa força tracionar o elemento cuja área está aplicada a força, será denominada de tensão de tração (HIBBELER, 2010).

Cordas de mesmos diâmetros, mas feitas de materiais distintos, tendem a suportar tensões de diferentes níveis antes que a sua deformação passe do regime elástico para o plástico. Um corpo em que a tensão está dentro do regime elástico do material, consegue retornar ao seu estado inicial com a retirada da carga, enquanto um corpo que sofre deformação plástica, mesmo retirando a tensão, fica deformado permanentemente, valores esses que dependem de cada material empregado (VOSOUGH, 2005).

2.3.2.2 Ressonância magnética

De acordo com Vosough (2005), as vibrações provenientes da excitação da corda de guitarra alteram o campo magnético gerado pelo captador gerando uma corrente. Consequentemente, quanto mais propriedades magnéticas a corda tem, mais tensão é gerada pelo captador, resultando em um som mais alto de saída.

2.3.2.3 Resistência à corrosão

A corrosão através do suor humano primariamente causa um impacto negativo na qualidade sonora das cordas, além da liberar íons metálicos da corda de guitarra, podendo prejudicar a saúde dos que são alérgicos a tal metal. Muitos fabricantes tentam compensar a corrosão das cordas de diferentes formas: por meio da adição de uma camada de um material polimérico que ajuda a conter a corrosão por um período, tanto através da criação de cordas feitas de materiais menos suscetíveis à corrosão como a prata e o ouro, mas estas são mais utilizadas por músicos profissionais (REZIC, 2009).

2.3.2.4 Relaxamento

É basicamente a capacidade da guitarra de se manter na afinação, ou seja, não alterar a tensão à medida que passa o tempo. Isso ocorre em razão da corda ficar tensionada por um determinado período de tempo, experienciando uma perda nessa tensão. Uma corda nova possuiu um período mais pronunciado de relaxamento, estabilizando com o tempo (VOSOUGH, 2005).

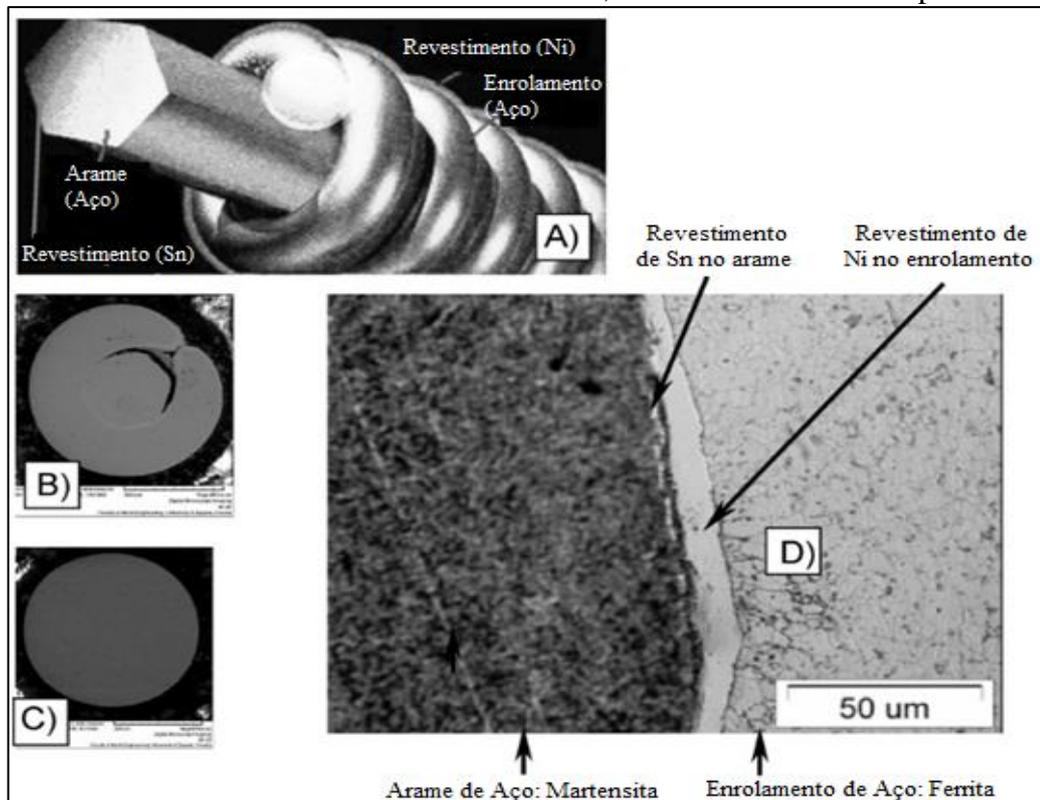
2.3.3 Materiais e microestrutura

As cordas de guitarra elétrica devem ser obrigatoriamente metálicas para que suas vibrações sejam captadas pelo captador, mas existem cordas feitas de outros materiais não metálicos, como o poliacetal. (DAJBYCH, 2019).

Segundo a fabricante de cordas Ernie Ball (2021), as cordas lisas geralmente são feitas de aço médio-alto carbono, ligas de aço e aço inoxidável, passíveis de tratamento térmico com o intuito de elevar a resistência à tração, aumentando a sua durabilidade. Cordas com enrolamento também utilizam os mesmos tipos de aços, e como o enrolamento externo sofre mais ação do uso, na maioria das vezes ele é feito de ligas de aço contendo materiais que auxiliam no combate à corrosão, como o níquel.

Ernie Ball (2021) diz que dependendo da especificação das cordas, elas podem receber um revestimento, tanto no fio sólido quanto no enrolamento. No fio sólido na maioria dos casos é utilizado estanho, que confere à corda resistência à corrosão. No enrolamento, a gama de materiais usados é um pouco maior, mas os principais são o níquel, que têm ótimas propriedades anticorrosivas, o cobalto, que aumenta as propriedades magnéticas da corda, o titânio, que auxilia na resistência à deformação da corda, informações estas que são representadas com base na Figura 12.

Figura 12 - A) Visualização de uma corda de aço revestido de estanho com enrolamento de aço revestido de níquel; B) Microscopia de uma corda de guitarra com enrolamento; C) Microscopia de uma corda de guitarra sem enrolamento; D) Microestrutura da seção transversal uma corda com enrolamento, vista com um microscópio.



Fonte: Adaptado de Rézic et al. (2010).

2.4 VIBRAÇÃO DAS CORDAS

A vibração de uma corda é considerada como um sistema contínuo, e por este motivo, deve-se considerar contínua a distribuição da massa, amortecimento e elasticidade, supondo também que cada ponto de um número infinito de pontos possa vibrar e por isso, esse sistema possui infinitos graus de liberdade (RAO, 2018).

2.4.1 Vibração transversal de uma corda

2.4.1.1 Equação do movimento

Considerando uma corda esticada de comprimento l , sujeita a uma força transversal $f(x,t)$ por unidade de comprimento, como demonstrado na Figura 13. O comprimento transversal da corda, $w(x,t)$, é considerado pequeno. O equilíbrio de forças na direção z é indicado na Figura 13 (RAO, 2018).

A força líquida que age sobre um elemento é igual à força de inércia que age sobre o elemento, onde P é a força (N), ρ é a massa por unidade de comprimento (kg/m) e θ o ângulo que a corda defletida faz em relação ao eixo x (rad) (RAO, 2018).

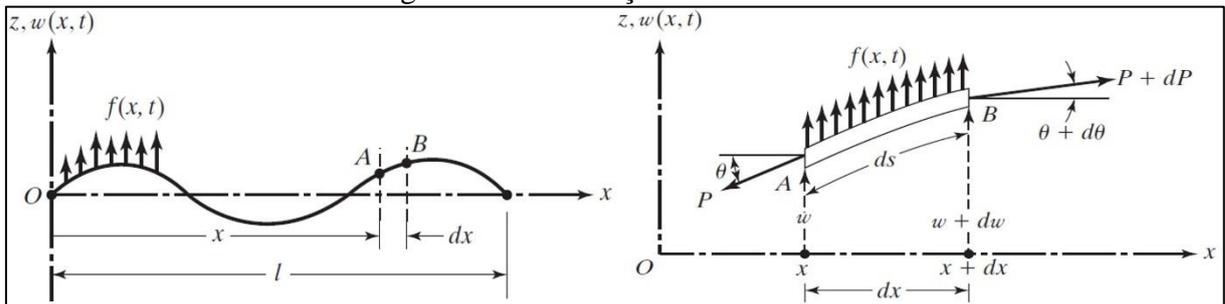
$$\begin{aligned} (P + dP) \sin(\theta + d\theta) + f dx - P \sin \theta \\ = \rho dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$dP = \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (6)$$

$$\text{sen } \theta \simeq \tan \theta = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (7)$$

$$\text{sen } (\theta + d\theta) \simeq \tan (\theta + d\theta) = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \quad (8)$$

Figura 13 - A vibração de uma corda



Fonte: Rao (2018).

Conseqüentemente, a Equação 5, correspondente a vibração forçada por corda não uniforme pode ser simplificada como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[P \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} \right] + f(x, t) = \rho(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \quad (9)$$

Se a corda for uniforme e mantiver sua tensão constante, a equação (9) se reduz a:

$$P \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + f(x, t) = \rho \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \quad (10)$$

Se $f(x, t) = 0$, é possível obter a equação da vibração livre:

$$P \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \quad (11)$$

ou

$$c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (12)$$

onde

$$c = \left(\frac{P}{\rho} \right)^{1/2} \quad (13)$$

2.4.1.2 Vibração livre em uma corda fixa em ambas as extremidades

Segundo Rao (2018), se a corda estiver fixa em ambas as extremidades, as condições de contorno são de $w(0,t) = w(l,t) = 0$ para todo o tempo $t \geq 0$, obtém-se:

$$W(0) = 0 \quad (14)$$

$$W(l) = 0 \quad (15)$$

$$B \operatorname{sen} \frac{\omega l}{c} = 0 \quad (16)$$

Como B não pode ser zero para uma solução não trivial, tem-se:

$$\operatorname{sen} \frac{\omega l}{c} = 0 \quad (17)$$

A Equação 17 é denominada equação de frequência e é satisfeita por vários valores de ω . Os valores de ω são denominados os autovalores (frequência natural) do problema.

$$\omega_n = \frac{n c \pi}{l}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (18)$$

A solução $w_n(x,t)$ corresponde a ω_n pode ser expressa como:

$$w_n(x,t) = W_n(x)T_n(t) = \operatorname{sen} \frac{n \pi x}{l} \left[C_n \cos \frac{n c \pi t}{l} + D_n \operatorname{sen} \frac{n c \pi t}{l} \right] \quad (19)$$

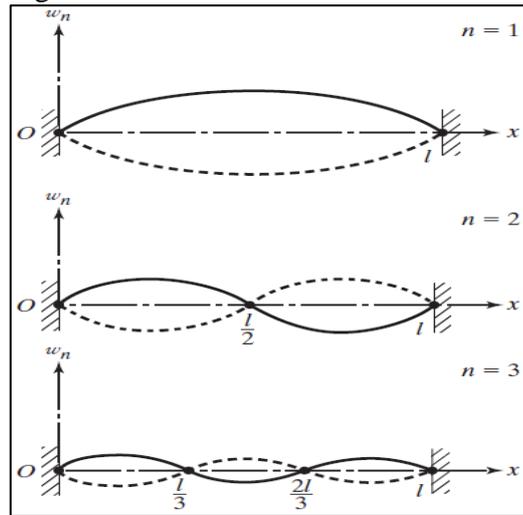
C_n e D_n são constantes arbitradas. A solução de $w_n(x,t)$ é chamada de n -enésimo modo de vibração, neste modo a corda vibra com uma amplitude proporcional ao valor de W_n , naquele ponto, com frequência circular $\omega_n = n c \pi / l$. A função W_n é chamada de função característica. Os três primeiros modos de vibração são mostrados na Figura 14, sendo $n = 1$ o modo fundamental e ω_1 a frequência fundamental. O período fundamental é: (RAO, 2018).

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2l}{c} \quad (20)$$

Rao (2018) diz que os pontos nos quais $w_n = 0$ para todos os tempos são determinados nós. A solução geral da Equação 12 que satisfaz as condições de contorno das equações 14 e 15 é dada pela superposição de todas as $w_n(x, t)$:

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x}{l} \left[C_n \cos \frac{n\pi t}{l} + D_n \sin \frac{n\pi t}{l} \right] \quad (21)$$

Figura 14 - Formas modais de uma corda



Fonte: Rao (2018).

De acordo com Rao (2018), a Equação 21 dá todas as possíveis vibrações de uma corda. A vibração particular que ocorre é determinada unicamente pelas condições iniciais especificadas, esta última gerando valores exclusivos das constantes C_n e D_n . Caso as condições iniciais forem especificadas:

$$\sum_{n=1}^{\infty} C_n \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{l} = w_o(x) \quad (22)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\pi}{l} D_n \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{l} = \dot{w}_o(x) \quad (23)$$

Segundo Rao (2018), estas equações podem ser vista na série de expansão de Fourier de $w_o(x)$ e $\dot{w}_o(x)$ no intervalo de $0 \leq x \leq l$. Os valores de C_n e D_n podem ser determinados a partir da multiplicação da equação 22 e 23 por $\operatorname{sen} (n\pi x/l)$ e integrando em função de x para o intervalo de 0 a l :

$$C_n = \frac{2}{n} \int_0^l w_o(x) \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{l} dx \quad (24)$$

$$D_n = \frac{2}{nc\pi} \int_0^l \dot{w}_o(x) \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{l} dx \quad (25)$$

A solução dada pela Equação 21 é identificada como métodos de superposição de modos, visto que a resposta é expressa como uma superposição dos modos normais. O procedimento é aplicável para encontrar não somente a solução da vibração livre, mas também da vibração forçada em sistemas contínuos (RAO, 2018).

2.4.2 Força exercida pela corda

A força exercida pode ser estimada com base na Figura 15, cuja primeira aproximação a força normal na ponte será $P \operatorname{sen} \beta$ e a força paralela a ponte será $P \operatorname{cos} \beta$, onde o P significa a força (N) e o ângulo β corresponde o ângulo entre a corda e o corpo da guitarra. (ROSSING, 2010).

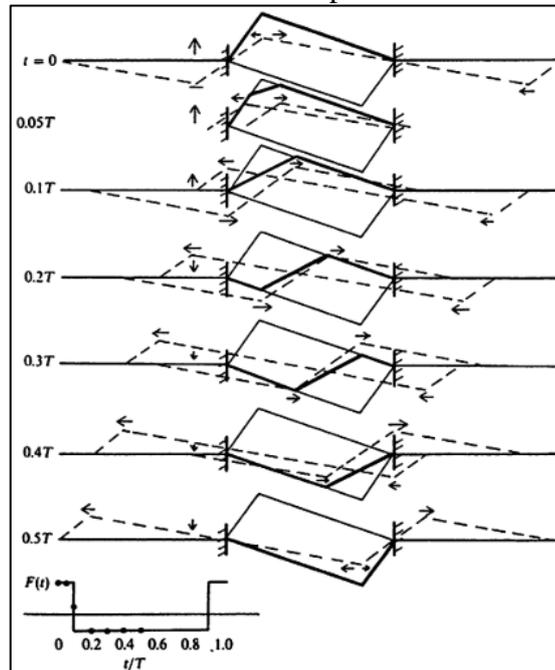
Segundo Rossing (2010), a força P muda durante o ciclo, à medida que o comprimento da corda muda. Considerando uma corda com seção transversal de área A e um módulo de elasticidade E , a força transversal e longitudinal podem ser escritas como:

$$F_T = (P_o + \Delta P) \sin \beta \quad (26)$$

$$F_L = (P_o + \Delta P) \cos \beta P_o + \frac{EA\Delta L}{L_0} \quad (27)$$

A mudança na força transversal durante o ciclo é devido à mudança de direção. Por outro lado, a mudança na força longitudinal durante o ciclo é devido à pequena variação no comprimento da corda. (FLETCHER, 1991).

Figura 15 - Análise do tempo de meio ciclo de movimento em uma corda excitada a 1/5 de distância da ponte.

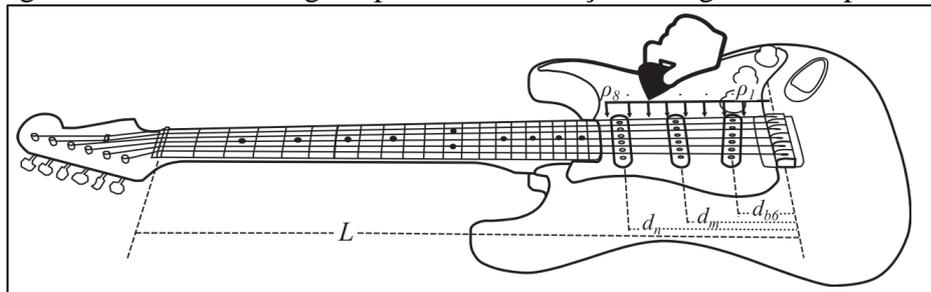


Fonte: Fletcher (1991).

2.4.3 O ato de excitar a corda

Na guitarra elétrica isto é feito utilizando os dedos ou com uma palheta. Não existem muitas pesquisas que estudaram a fundo as mecânicas de cada tipo de *plucking* (excitar a corda) (ROSSING, 2010). No caso da utilização do dedo, a interação entre dedo e corda dura aproximadamente 100 ms. Dentro deste período são criadas ondas transversais e longitudinais, alterando as forças locais no ponto da excitação. Ao aumentar a intensidade de excitação, aumenta o tempo de contato e por sua vez, ao aumentar a rigidez do dedo resulta em um contato mais curto (PAVLIDOU, 1995 apud ROSSING, 2010). Na Figura 16, é possível ver os pontos comuns de excitação, situados perto da região dos captadores.

Figura 16 - Guitarra e alguns pontos de excitação na região dos captadores



Fonte: Mohamed et al. (2017).

2.4.4 Análise harmônica

2.4.4.1 Série de fourier

O movimento harmônico é o mais simples de tratar, sendo que a maioria dos sistemas vibratórios não são harmônicos. Todavia, em muitos casos a vibração é periódica, a qual a série de Fourier pode descrever essa vibração pela soma infinita dos senos e cossenos (RAO, 2018).

Se $x(t)$ é uma função periódica de período τ , a série de Fourier pode ser representada:

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2 \omega t + \dots \\ &\quad + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2 \omega t + \dots \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \end{aligned} \quad (28)$$

Sendo que $\omega = 2\pi/\tau$ é a frequência fundamental e $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$ são coeficientes constantes. Para determinar os coeficientes a_n e b_n multiplica-se a equação 28 por $\cos n\omega t$ e $\sin n\omega t$, respectivamente e integra-se sobre um período $\tau = 2\pi/\omega$, variando de 0 a $2\pi/\omega$ por exemplo. Pode-se notar, assim, que todos os termos exceto um do lado direito, será zero. Então obtém-se:

$$a_0 = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} x(t) dt = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} x(t) dt \quad (29)$$

$$a_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} x(t) \cos n\omega t dt = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} x(t) \cos n\omega t dt \quad (30)$$

$$b_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} x(t) \sin n\omega t dt = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} x(t) \sin n\omega t dt \quad (31)$$

A interpretação física da equação 28 é de que qualquer função periódica pode ser representada pela soma das funções harmônicas. Mesmo que a equação 28 tenha uma soma infinita, pode-se aproximar a função com o auxílio de algumas funções harmônicas. (RAO, 2018).

A série de Fourier também pode ser representada pela soma dos termos somente em seno ou somente em cosseno.

$$x(t) = d_0 + d_1 \cos(\omega t - \phi_1) + d_2 \cos(2\omega t - \phi_2) + \dots \quad (32)$$

onde

$$d_0 = a_0/2 \quad (33)$$

$$d_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \quad (34)$$

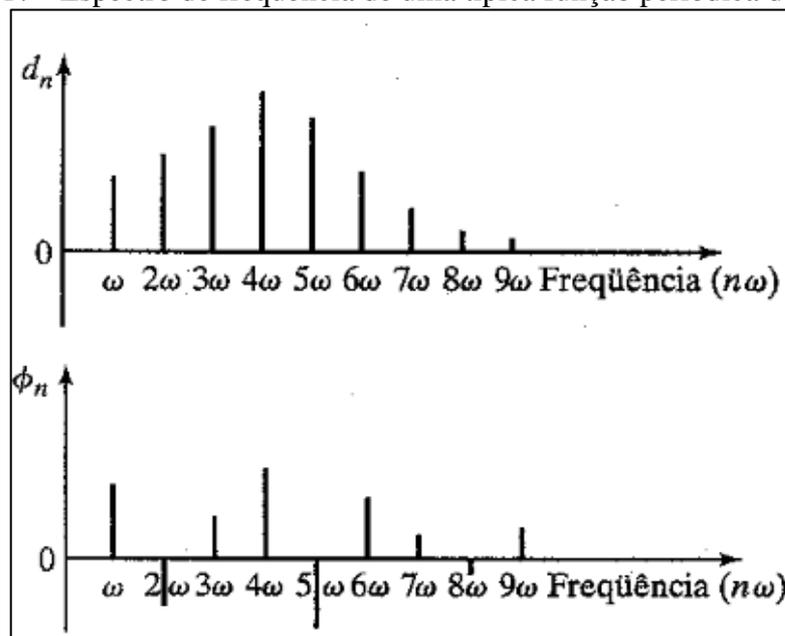
e

$$\phi_n = \text{tg}^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (35)$$

2.4.4.2 Espectro de frequência

As funções harmônicas $a_n \cos n\omega t$ ou $b_n \sin n\omega t$ na Equação 28 são denominadas as harmônicas de ordem n da função periódica $x(t)$. A harmônica de ordem n tem um período τ/n . Estas harmônicas podem ser representadas como linhas verticais em um diagrama de amplitude (a_n e b_n ou d_n e ϕ_n) em relação a frequência ($n\omega$) denominado espectro da frequência, como pode ser visto na Figura 17. (RAO, 2018).

Figura 17 - Espectro de frequência de uma típica função periódica de tempo.

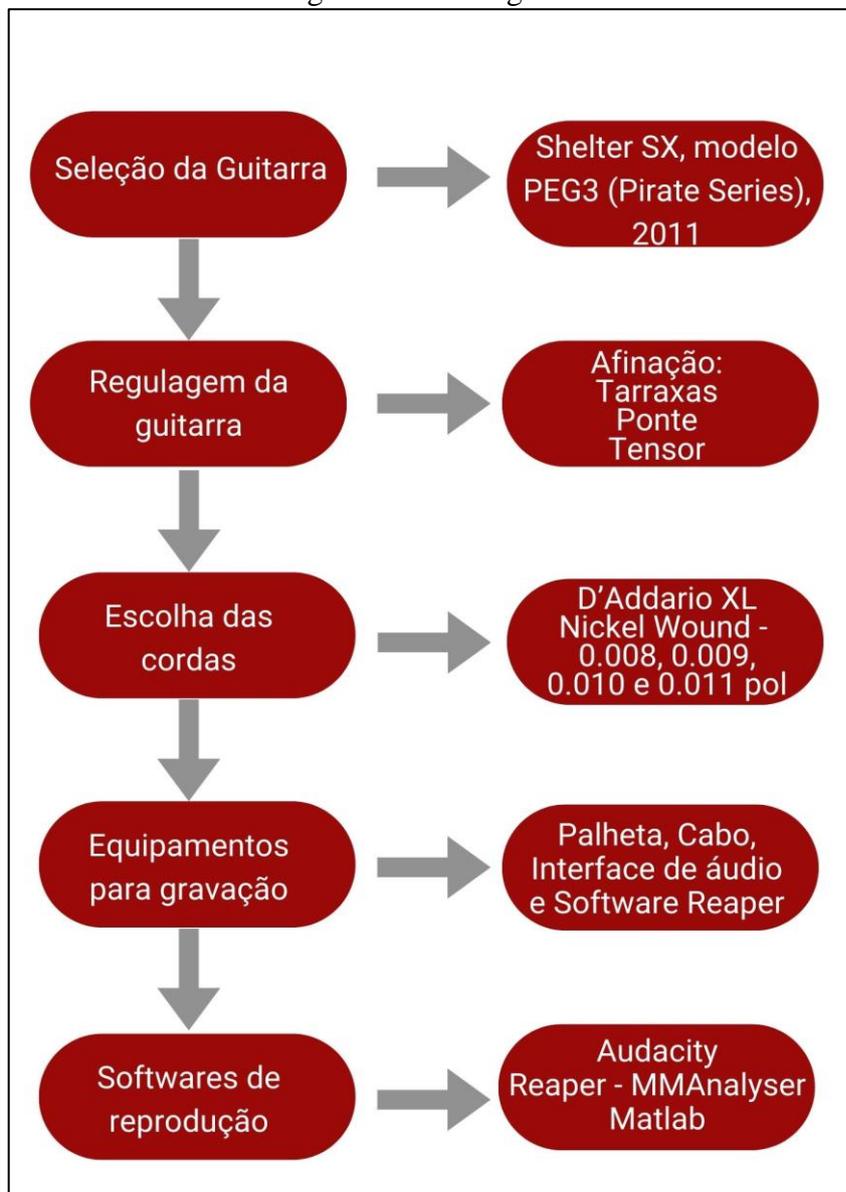


Fonte: Rao (2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A característica sonora influencia na identidade musical do músico ou de um cantor. Em um cenário onde somente as cordas de guitarra são analisadas, a alteração de alguns parâmetros como o material utilizado na corda, o processo de fabricação da corda, a regulagem da guitarra e também a forma com que a corda é excitada modificam a sonoridade da guitarra de maneiras diferentes entre si. Assim, foi desenvolvido um fluxograma para demonstrar a sequência de passos feito neste trabalho, visto na Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma



Fonte: O autor (2022).

3.1 A GUITARRA

A seleção do instrumento foi pensada com base em algumas restrições, primariamente ao fato de que essa análise das frequências levam em consideração as equações que descrevem uma corda de guitarra, vistas no capítulo anterior. Assim, com base nestas equações, a guitarra deve ter as cordas apoiadas nas suas extremidades, fato que é atingido somente em guitarras com ponte fixa, pois em guitarras com pontes do tipo tremolo, é possível alterar a tensão da guitarra pela própria ponte.

Segundo Kemp (2017), a ponte do tipo tremolo apresenta variação nas frequências, pelo fato da fixação e estabilização ser feita por molas. Um simples fato de excitar a corda faz com que mude a tensão da corda, e por menor que seja, faz a ponte sair do seu ângulo de repouso, causando uma alteração na frequência.

A guitarra utilizada é da marca Shelter SX, modelo PEG3 (*Pirate Series*), fabricada no ano de 2011, visualizada na Figura 19.

Figura 19 - Guitarra Shelter SX PEG3



Fonte: O autor (2022).

De acordo com a fabricante SX Guitars (2022), a guitarra possui corpo feito de freixo claro, braço de mogno parafusado no corpo, escala colada de jacarandá com tamanho total de 625 mm (da pestana até a ponte) e 22 trastes de aço com revestimento de níquel, pestana feita de osso sintético com largura de 42 mm, ponte fixa do estilo *tune-o-matic*, portando dois captadores *humbucker*, dois potenciômetros lineares e dois potenciômetros logarítmicos, que comandam o volume de saída e a tonalidade para cada captador, além de uma chave seletora de três posições, escolhendo qual captador é utilizado.

3.2 REGULAGEM DA GUITARRA

A guitarra é um instrumento de cordas, que possibilita fazer uma regulagem na afinação do instrumento a partir de três formas, cada uma com suas características que afetam o som do instrumento.

A primeira é utilizando as tarraxas da guitarra, como na Figura 20, sendo possível por ela aumentar ou diminuir a tensão da corda, conseqüentemente mudando assim a sua frequência. Esta forma é a comum para afinar o instrumento porque é a que de fato permite uma alteração fácil dessa afinação.

Figura 20 - Tarraxas da guitarra



Fonte: O autor (2022).

A segunda forma é a regulagem da ponte, ou também chamada de regulagem das oitavas. Essa regulagem se dá na alteração do ponto de fixação da corda, onde ela fica engastada na ponte e sua finalidade é alterar o comprimento total da corda, vide Figura 21. Como esta ponte é do tipo *tune-o-matic*, a regulagem se dá pelos parafusos na parte inferior da ponte.

O efeito que essa regulagem gera, influi diretamente nos harmônicos que são excitados. Cada corda terá uma regulagem diferente desse comprimento, e caso o comprimento esteja fora do ideal, mesmo a guitarra estando afinada pelas tarraxas, as notas excitadas em quaisquer casas da guitarra soarão desafinadas, pois o comprimento da corda não está compatível com a escala do braço. Essa desafinação é o resultado das frequências estarem diferentes do *pitch* correto para cada nota.

Figura 21 - Ponte fixa *tune-o-matic*



Fonte: O autor (2022).

A terceira forma também tem relação com o comprimento da corda da guitarra, mas ela é feita pelo braço da guitarra, em uma peça interna chamada tensor, visto na Figura 22. O braço por ser de madeira pode sofrer a ação do tempo, que o faz perder a sua tensão, assim ele não se mantém reto, conseqüentemente envergando, alterando o comprimento total da guitarra e por conseguinte o das cordas, pois uma das partes que a corda se apoia chamada de pestana ou *nut*, está presa no braço da guitarra. Apesar dele alterar o comprimento da corda, a regulagem das oitavas/harmônicos é feita na ponte, assim, comumente é feita a regulagem no braço da guitarra para correções de empenamento do braço.

Figura 22 - Tensor da guitarra



Fonte: O autor (2022).

A ordem convencional das regulagens de acordo o luthier Clésio Stanislaski, que efetuou a regulagem desse instrumento, se iniciou com a retirada das cordas para proceder uma limpeza e hidratação da escala e também foram retirados os trastes para uma limpeza, visualizado na Figura 23. Na sequência, foi feita a regulagem no tensor para fazer o endireitamento do braço e a instalação dos trastes. Assim, as cordas foram colocadas novamente e afinadas utilizando as tarraxas, pois assim é possível fazer a regulagem das oitavas na ponte, além de verificar se a regulagem do braço está correta, sem empenamento.

Figura 23 - Limpeza da escala e trastes



Fonte: O autor (2022).

Uma forma de verificar se a regulagem das oitavas está correta, é tocando a corda solta, observando se está afinada, para depois excitar a mesma corda na 12ª casa da guitarra, que corresponde a mesma nota, mas uma oitava acima (dobro da frequência), verificando também se está exatamente o dobro da frequência. Este método de verificação e regulagem é feito para cada corda da guitarra.

3.3 ESCOLHA DAS CORDAS

Quando um músico escolhe as cordas que vai utilizar em seu instrumento, como na Figura 24, geralmente ele analisa qual é a fabricante das cordas e o diâmetro do jogo de corda. Existem outros fatores, como material utilizado nas cordas, revestimento e até o formato do enrolamento, que afetam a sonoridade que as cordas produzirão.

Um quesito importante é sobre o revestimento da corda, fator de suma importância quando o quesito é a resistência à corrosão, que afeta diretamente na durabilidade da corda e também da sua sonoridade. Rézić (2010), concluiu em seu estudo que as cordas com enrolamento experenciam uma taxa de corrosão parabólica, enquanto as cordas sem enrolamento apresentam uma taxa linear. A liberação dos íons de Níquel foi maior nas cordas com enrolamento do que as que não tem enrolamento, podendo ser determinada pela solubilidade do revestimento.

Figura 24 - Cordas sem enrolamento (fio sólido) e com enrolamento



Fonte: O autor (2022).

Por conta destes motivos, foram escolhidas cordas de guitarra D'Addario XL *Nickel Wound*, o mesmo modelo para os quatro jogos de corda 0,008 pol (0,2032 mm), 0,009 pol (0,2286 mm), 0,010 pol (0,254 mm) e 0,011 pol (0,2794 mm), ilustrado pela Figura 25, o jogo de cordas é

indicado sempre pela corda mais fina e a sua unidade de medida é em polegadas, um padrão universal entre as fabricantes de cordas. No meio musical elas são comumente referidas pelos últimos números, como 08, 09, 010 e 011.

Segundo D'Addario (2022), o modelo das cordas XL são designadas quando se tem a utilização de um fio de aço alto carbono a partir do processo de trefilação, feito pela própria fabricante, para garantir cordas dentro das especificações, assegurando um produto com qualidade e alto desempenho. Estas cordas possuem revestimento de níquel, a partir de um processo chamado de niquelação, para aumentar a resistência a corrosão das cordas. A corda modelo XL Nickel possui características sonoras em que o timbre da guitarra é equilibrado, ideal para uma grande variedade de estilos musicais. Outra característica é o fio sólido das cordas com enrolamento, que ostenta o formato hexagonal, permitindo com que o enrolamento tenha uma melhor firmeza com o fio sólido, conferindo durabilidade e estabilidade dimensional.

Figura 25 - Jogos de cordas D'Addario XL Nickel Wound



Fonte: O autor (2022).

3.4 EQUIPAMENTO PARA GRAVAÇÃO

Nesta secção, o modo como é feita a captura do som da guitarra é de suma importância para o resultado final. Portanto, a escolha dos equipamentos que farão parte de todo conjunto foi feita com base em uma congruência entre o equipamento principal, no caso a guitarra, e a necessidade de uma fidelidade sonora para a melhor demonstração das frequências geradas pelas cordas da guitarra.

Os equipamentos que compõem todo este conjunto são: palheta, cabo P10, interface de áudio, *software* de gravação.

A palheta, que é usada para excitar a corda, também pode influenciar na sonoridade da corda, pois dependendo da espessura, ela flexiona a certo ponto que, ao encostar na corda, gera um som estalado que é indesejado na maioria dos casos. Além disso, tocar as cordas com uma rapidez maior, é mais difícil com uma palheta que flexiona.

Com estas colocações em mente, a palheta selecionada, vista na Figura 26, foi da marca Jim Dunlop, modelo *Stubby Jazz*, com espessura de 3 mm. Segundo Jim Dunlop (2022), a palheta é feita de *Lexan*, marca registrada da empresa General Electric, correspondendo a uma resina de policarbonato, que confere uma grande durabilidade e resistência à deformação, permitindo que o guitarrista tenha uma maior agilidade ao tocar as cordas.

Figura 26 - Palheta Jim Dunlop Stubby Jazz



Fonte: O autor (2022).

O cabo utilizado para fazer a ligação entre a guitarra e a interface de áudio foi da marca Tecnoforte, modelo Signature Edu Ardanuy, observado na Figura 27. Segundo a fabricante Tecnoforte (2022), este cabo possui nas extremidades conexões do tipo P10, que é um padrão de conexão entre instrumentos musicais de cordas e os equipamentos que são atrelados a eles, com um revestimento têxtil no entorno do cabo, sendo mais durável que um revestimento emborrachado, além da conexão P10 possuir um revestimento de níquel que aumenta a sua resistência a corrosão. Sua capacitância é de 39 pF/ft, considerada equilibrada. A fabricante disponibiliza ainda uma tabela com escala de 1 a 10 para as frequências graves, médias, agudas e a resistência mecânica do cabo, resultando em 9, 10, 8,5 e 9 respectivamente, sendo 10 a melhor nota.

Figura 27 - Cabo Tecnoforte Signature Edu Ardanuy



Fonte: O autor (2022).

A interface de áudio é utilizada para fazer a comunicação entre a fonte sonora até o *software* utilizado para fazer a gravação deste som. Existem interfaces das mais variadas, mas a ideal para a utilização com instrumentos musicais é a do tipo MIDI, que é desenvolvida

especificamente para que seja possível a comunicação entre instrumento, computador e diferentes *softwares* e *hardwares*.

Esta interface da Figura 28 é da marca M-Audio, modelo Fast Track Ultra, fabricada em 2008, do tipo MIDI. De acordo M-AUDIO (2022), possui oito canais com gravação simultânea, entradas e saídas de áudio digitais ou analógicas, taxa de *bits* máxima de 24 e taxa de amostragem de até 96 kHz, que garante uma gravação de áudio com qualidade profissional, dispondo de uma conexão interface de áudio-computador por meio de uma tomada USB 2.0.

Figura 28 - Interface de áudio M-AUDIO Fast Track Ultra

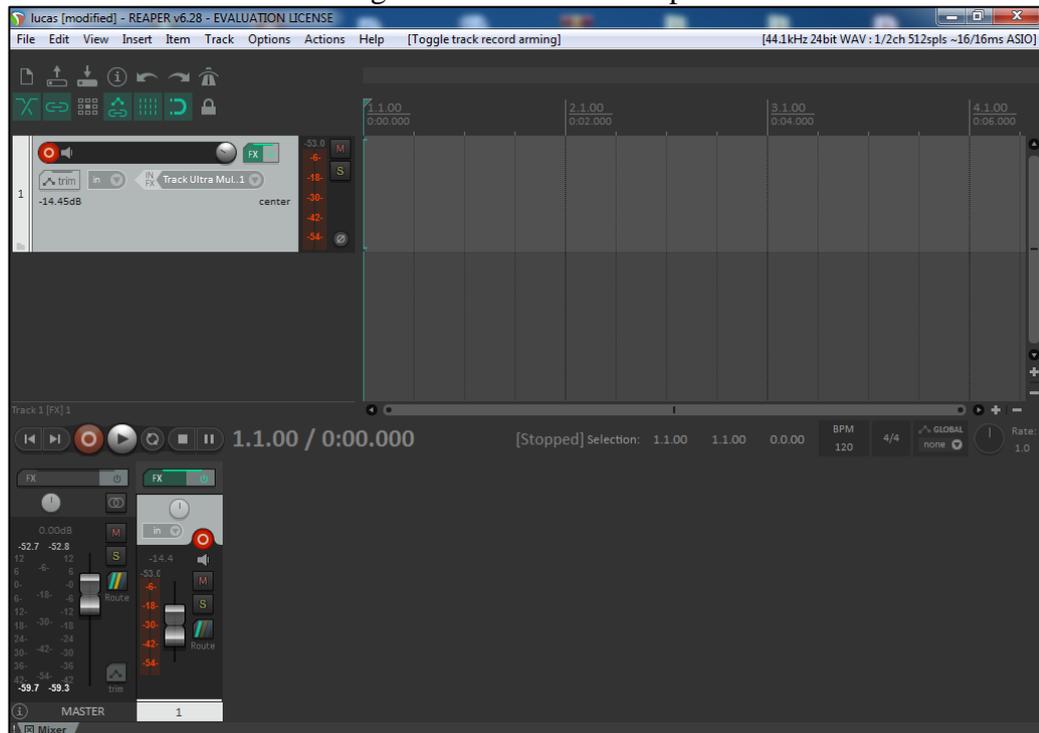


Fonte: O autor (2022).

Para fazer a gravação deste som proveniente da interface de áudio, é necessário um *software* cuja função é a gravação de áudio, principalmente do tipo MIDI, para ser compatível com a interface de som utilizada. Assim, o *software* escolhido foi o REAPER, que cumpre o requerimento inicial de gravar sons do tipo MIDI, intuitivo e também por possuir uma simples interface, vista na Figura 29. De acordo com Reaper (2022), ele possui suporte a vários efeitos e *plugins* que podem ser adicionados na gravação, além de um processamento de áudio em 64 *bit*, possibilitando fazer uma gravação e renderização do áudio em uma alta taxa de amostragem.

O Reaper tem uma grande compatibilidade de sistema de áudios como o ASIO, WASAPI, Kernel Streaming, entradas e saídas para até 62 sistemas MIDI, lê e grava áudio nos formatos mais conhecidos como AIFF, AVI, BWF, CD ISO, FLAC, MIDI, MOGG, MOV, MUSICXML, MP3, OGG VORBIS, OGG OPUS, RF64, SYX, W64, WAV e WAVPACK. (REAPER, 2022).

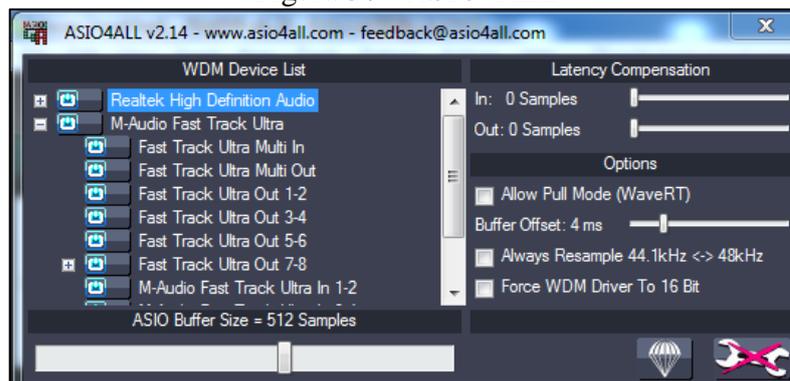
Figura 29 - Software Reaper



Fonte: O autor (2022).

Em conjunto com o Reaper, foi utilizado um *software* chamado ASIO4ALL, como se vê na Figura 30, cuja função principal é integrar todas as entradas e saídas do dispositivo, neste caso, a interface de som, para fazer o processamento desse áudio antes que ele seja processado pelo *driver* do Windows. Isso faz com que tenha praticamente zero latência, fato que faz uma enorme diferença, pois na gravação de um instrumento musical é necessário ter uma baixa latência, para que não tenham problemas na gravação, principalmente quando está acompanhado de outros instrumentos. Além disto, é possível selecionar a taxa de amostragens e também a taxa dos *bits*, diferente do *driver* do Windows que não é possível fazer essa alteração.

Figura 30 - ASIO4ALL



Fonte: O autor (2022)

3.5 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA GUITARRA

Conhecida a guitarra utilizada, cordas e os outros equipamentos, pode-se definir alguns parâmetros referidos à guitarra que serão levados ao longo das gravações.

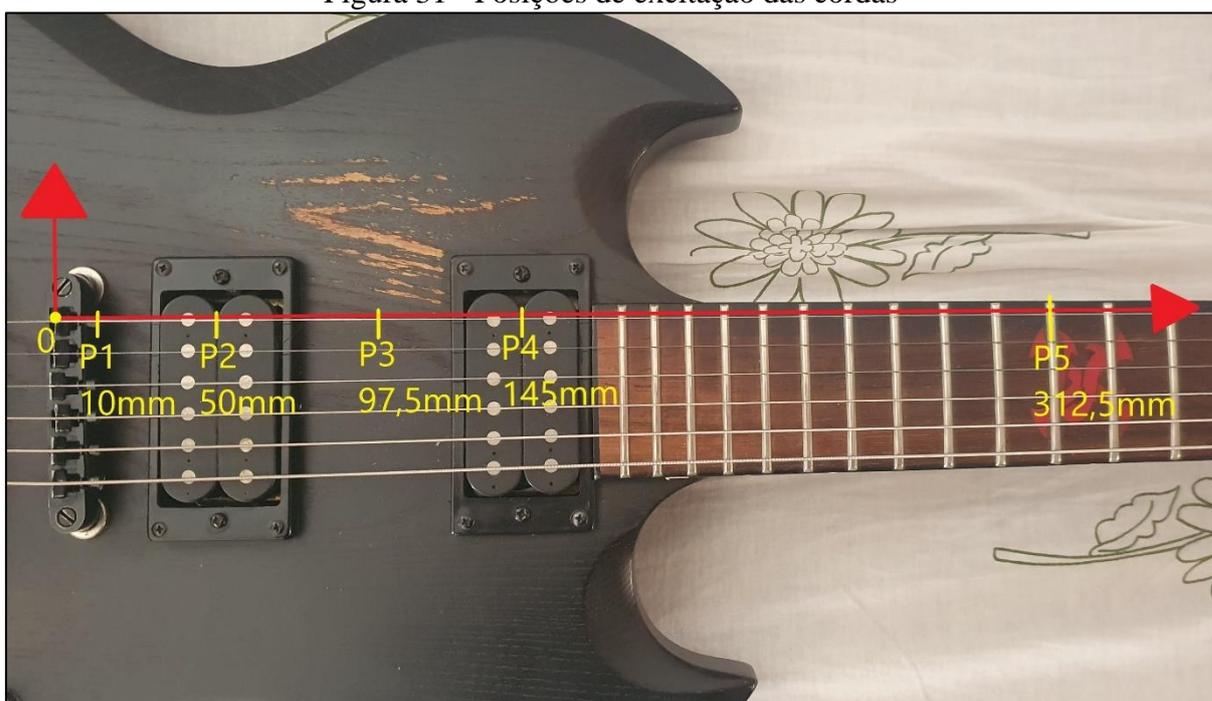
O primeiro aspecto é quanto a afinação da guitarra. As cordas utilizam a afinação Lá do Diapasão A₄ (440 Hz), um padrão da indústria musical atual (MED, 1996).

Quanto aos potenciômetros de controle do volume e tonalidade da guitarra, foram deixados no máximo. No caso do volume, se esse não for deixado no máximo, a intensidade sonora seria muito inferior. Tal fato não é interessante pois posteriormente haveria a necessidade de aumentar essa intensidade por meio do Reaper, de forma que geraria uma distorção sonora, interferindo as frequências produzidas. A diminuição da intensidade do potenciômetro de tonalidade traz como resultado uma supressão de certas frequências, principalmente as agudas. Portanto, deixando-o no máximo, não suprime nenhuma frequência, não interferindo na sonoridade, o que é ideal para a análise feita.

Na parte de captação, foi mantido o mesmo captador que fez a captação do som para todas as gravações, no caso o captador da ponte.

Por fim, o parâmetro mais relevante a ser definido são as posições de excitação das cordas. No total foram escolhidas cinco posições, demonstradas na Figura 31.

Figura 31 - Posições de excitação das cordas



Fonte: O autor (2022).

A escolha destas posições se deu pensando em pontos que fossem interessantes para uma análise e também levando em consideração as posições em que os guitarristas geralmente costumam tocar.

A posição P1 é a mais próxima da ponte, e é a distância onde a corda é apoiada na ponte até os parafusos de regulagem da ponte, que é 10 mm, correspondendo a $1/62,5$ do comprimento total, que é medido da ponte até a pestana. A posição P2 se deu exatamente no centro do captador da ponte, totalizando uma distância de 50 mm para a ponte, distancia essa de $5/62,5$ do comprimento total. Já a posição P3 foi escolhida a metade entre a distância dos centros dos captadores, totalizando 97,5 mm de distância para a ponte. Por sua vez, a posição P4 se dá exatamente no centro do captador do braço, com distância de 145 mm para a ponte, com $29/125$ do comprimento total. Finalizando, a posição P5 está posicionada na 12ª casa da guitarra, que corresponde à metade do comprimento total, estando a 312,5 mm da ponte.

3.6 MÉTODO EXPERIMENTAL

Para garantir que se tenha um resultado confiável, o mesmo método foi repetido para todas as gravações feitas.

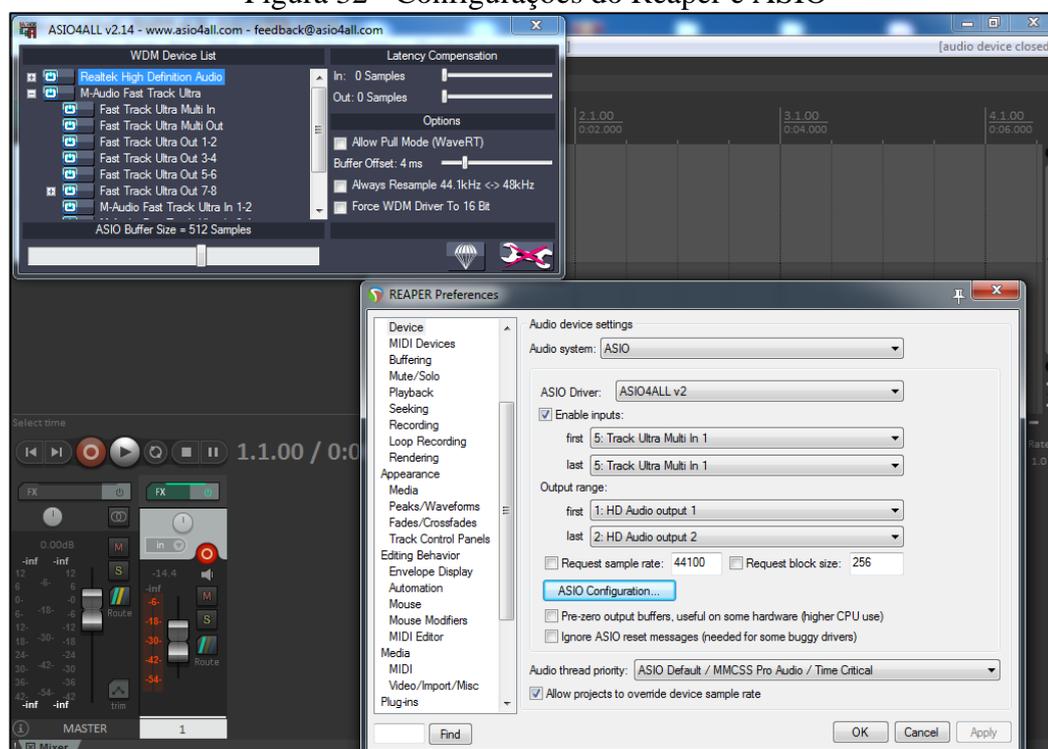
A primeira operação foi conectar o cabo P10 na guitarra e na entrada 1 da interface de áudio, e o volume de entrada da interface foi selecionado de modo que não ultrapassasse a intensidade de 0 dB, para que o som não fosse amplificado com distorção. Um led de coloração vermelha se ascenderia caso o sinal ultrapassasse 0 dB, o que nunca aconteceu durante os testes.

Na sequência, foi aberto o *software* Reaper, para iniciar o procedimento de gravação. Inicialmente, foi necessário inserir uma nova faixa de gravação, que habilita a escolha de recursos como a adição de efeitos sonoros, a entrada de áudio, mudança da intensidade sonora (pré-amplificação), nos quais não foram feitas adições ou alterações. Cada faixa de gravação corresponde a uma entrada de áudio. Para cada áudio, foi utilizado somente uma faixa de gravação. No caso de vários instrumentos separados, seriam adicionados mais faixas de gravação.

Nas configurações do próprio *software*, alguns parâmetros tiveram a necessidade de serem alterados, vide Figura 32, para que fosse possível fazer a gravação por meio da interface de áudio. O primeiro foi o sistema de áudio com o *driver*, feito pelo ASIO4ALL, integrando todas as conexões de dispositivos ligados ao computador, incluindo a interface de áudio, onde foram ativados o *driver* do próprio computador (Realtek Audio) e também a interface de áudio

M-AUDIO Fast Track Ultra e seus canais. As outras configurações como o tamanho do *buffer*, *buffer offset* e a compensação da latência não foram alterados.

Figura 32 - Configurações do Reaper e ASIO



Fonte: O autor (2022).

Após esta ação, foram alteradas as configurações dos dispositivos de áudios dentro do Reaper, habilitando as entradas de áudio e na secção onde se tem a entrada de áudio (*inputs*), foi selecionada a da interface de som M-AUDIO Fast Track Ultra Canal 1. Já a saída de áudio, foi selecionada a que corresponde a caixa de som do computador, apenas para o controle sonoro da gravação, pois que essa não tem influência nenhuma na parte de gravação. Quanto à taxa de amostragem, foi selecionada um valor de 44100 Hz, utilizada nos CD's, e o tamanho do *buffer* de 512, valores estes já predefinidos pelo ASIO.

Antes de iniciar as gravações, é importante definir a posição que se mantém o instrumento, a posição em que foi mantida guitarra é uma das mais comuns de se utilizar, apoiada sobre uma das pernas e no abdômen do guitarrista, como vista na Figura 33. Após posicionada, o instrumento não foi mais mexido desta posição, para que não exista nenhuma alteração nas frequências. A medida que se movimentava a guitarra, a madeira do braço e do corpo, por ser um material anisotrópico, aumenta ou diminui de comprimento, dependendo da disposição das fibras, o que é suficiente para gerar uma alteração na frequência da corda e, por menor que seja, não é desejada.

Figura 33 - Guitarra posicionada para os testes



Fonte: O autor (2022).

Com a guitarra devidamente posicionada, é possível fazer a afinação do instrumento. A utilização de afinadores convencionais, como os digitais ou os do tipo clip, não oferecem uma boa leitura da frequência, pois não informam a frequência numérica, esta que facilita para se chegar na afinação correta, com uma maior precisão.

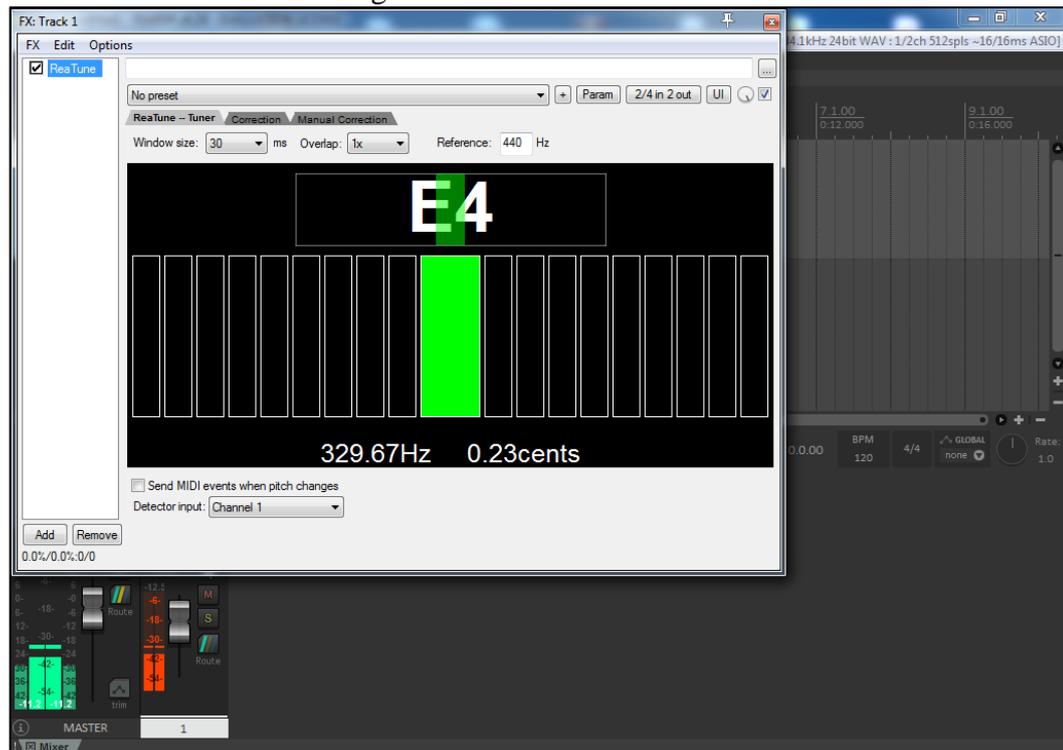
Dentro do *software* Reaper, existem diversos efeitos que podem ser adicionados à gravação do áudio. Um deles é chamado de ReaTune, visto na Figura 34, cuja função é ser um afinador digital para a guitarra ou violão. Sua precisão é de duas casas decimais, fato que praticamente nenhum afinador convencional entrega. Por este motivo é possível se aproximar com uma maior precisão do *pitch* correto. Seguindo a ordem de frequência, da corda mais espessa para a mais fina, as frequências exatas para referência são E₂ (82.41 Hz), A₃ (110,00 Hz), D₃ (146,83 Hz), G₃ (196,00 Hz), B₃ (246,94 Hz), E₄ (329,63 Hz), de acordo com a escala de temperamento equivalente. (SUITS, 1998).

Portanto todas as cordas foram afinadas antes de cada gravação, e como pode-se ver na Figura 34, a afinação nem sempre ficará com exatamente o mesmo *pitch* das frequências referenciais, visualizadas pelos *cents* de diferença para à referencial. Cada *cent* corresponde a 0,302 Hz. (SUITS, 1998).

Um aspecto importante da gravação é a escolha do formato de áudio que será gravado, para garantir a fidelidade sonora, que é de extrema importância na hora da gravação. O Reaper grava e reproduz vários formatos de áudio, mas o escolhido foi o formato WAV. O formato

WAV (*Waveform Audio File Format*) foi desenvolvido pela Microsoft e IBM com o objetivo de não ter perdas na qualidade, por meio de um formato que não tem perda de dados, reproduzindo com altíssima fidelidade o que foi gravado, essencial para esta análise. É muito utilizado em gravações profissionais, porém por não ter perdas de dados, acaba ocupando muito espaço do armazenamento, dependendo do tempo da gravação.

Figura 34 - Afinador ReaTune



Fonte: O autor (2022).

A primeira gravação feita foi para as 5 diferentes posições de excitação, utilizando a corda cujo diâmetro é 0,010, afinada em Mi (E_4), do jogo de cordas 0,010. Em cada posição de excitação foi feita uma gravação de aproximadamente 7 segundos, para que fosse possível captar o som desde a excitação até a cessação gradativa da intensidade sonora, pela corda retornando ao estado de repouso.

Na sequência, foram efetuadas as gravações para a mesma nota e frequência em diferentes cordas do mesmo jogo. Então, a nota escolhida foi a E_4 , do jogo de cordas 0,010. Na primeira corda (0,010 pol) a nota corresponde a corda solta, já na segunda corda (0,013 pol) a nota está na quinta casa, na terceira corda (0,017 pol) ela se situa na nona casa, já na quarta corda (0,026 pol) encontra-se na 14ª corda e, por fim na quinta corda (0,036 pol), a nota está na 19ª casa, posições estas vistas na Figura 35. A posição de excitação não sofreu alterações, pois sempre foi utilizada a P3.

Com o mesmo jogo de cordas 0,010, gravou-se também um acorde, Mi Menor (Em) nas 5 posições de excitação definidas anteriormente. Esse é um acorde de quinta, que é composto de 3 notas: a Mi (E), que é a frequência fundamental na sexta corda (0,046 pol), solta, também se encontra na quarta corda (0,026 pol), segunda casa, e na primeira corda, solta, (0,010 pol);

Figura 35 - Nota E₄ em diferentes cordas da guitarra

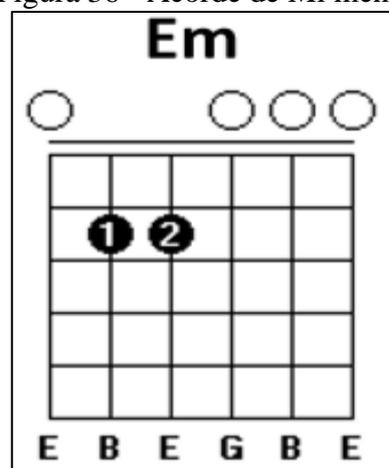


Fonte: O autor (2022).

A segunda nota é a Sol (G), sendo a terça do acorde, está localizada na terceira corda (0,017 pol), solta;

A terceira nota é a nota Si (B), sendo a quinta deste acorde, que está na segunda corda (0,013 pol), solta e também na quinta corda (0,036 pol), segunda casa. O acorde Em pode ser visto na Figura 36.

Figura 36 - Acorde de Mi menor



Fonte: Adaptado de Miller (2005)

Por fim, a última gravação foi a dos quatro diferentes jogos de corda, cuja análise feita será somente da primeira corda, afinada em E_4 , totalizando 4 gravações, todas na mesma posição de excitação. Cada jogo de cordas requereu uma nova regulagem da guitarra, pois com a mudança do diâmetro das cordas, muda a tensão necessária para fazer a afinação nas frequências corretas, exigindo a regulagem do braço e das oitavas. De acordo com Vosough (2005), as cordas novas passam por um período de relaxamento, perdendo parte do seu tensionamento, fato que dura por um período de 24 horas, até estabilizar. Por este motivo, a gravação foi feita somente depois de 24 horas que o jogo em questão foi instalado.

A sequência de passos para a gravação dos jogos foi a mesma para os 4 jogos, assim, garantiu-se o mesmo método para que os resultados obtidos sejam os mais precisos.

3.7 SOFTWARES DE REPRODUÇÃO

Com as gravações concluídas, os arquivos gerados puderam ser utilizados em *softwares* que consigam lê-los e fazer a transformada de Fourier, para assim transformar o som gerado em um gráfico de frequência (Hz) por intensidade sonora (dB), como pode ser visto na Figura 17.

O primeiro *software* utilizado é o Audacity um *software* de edição digital de áudio, com múltiplas faixas simultâneas, com possibilidades de edição em vários formatos de áudio, além de recortar, copiar, misturar, e juntar áudios, com simples interface e usabilidade.

O Audacity foi usado para carregar os áudios gravados e corta-los, deixando-os com uma duração de 1 segundo, começando imediatamente após a nota ser tocada, eliminando o ruído inicial da palheta excitando as cordas, garantindo que o mesmo não interfira na análise das frequências. Dentro do *software* existe uma função que ao selecionar um pedaço do áudio em questão, é possível fazer uma análise do espectro de frequências, gerando um gráfico de frequências (Hz) por intensidade sonora (dB) que é de suma importância para a análise das frequências e os harmônicos gerados. A escala de intensidade sonora é

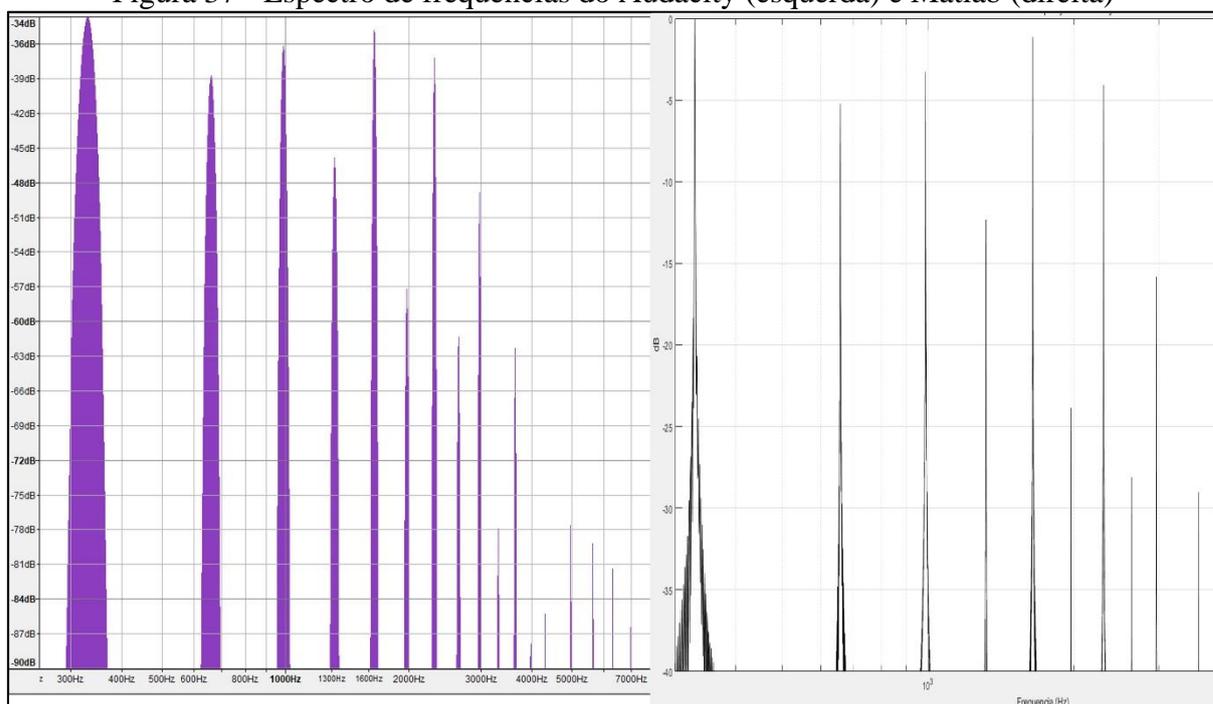
Dentro do Reaper, é possível adicionar extensões e *plugins* que atuam em conjunto com o *software* e, no caso, foi instalado o *plugin* chamado de MMAlyzer, que consegue analisar o espectro de frequências de vários áudios simultâneos, propiciando uma melhor comparação das frequências resultantes entre os áudios, ajudando a explicar o que cada resultado significa.

Por fim, também foi utilizado o *software* Matlab, versão 2019a, amplamente utilizado no mundo todo, por conta da sua versatilidade e usabilidade na construção de algoritmos que envolvam operações repetitivas e complexas. Portanto, foi desenvolvido um algoritmo que possibilita a leitura do áudio previamente gravado, fazendo o processamento do mesmo, conseguindo entregar graficamente o resultado das frequências (Hz) pela intensidade sonora (dB).

3.7.1 Comparação entre os softwares

Cada *software* utiliza um método matemático para a transformação do som em um gráfico de frequência por intensidade sonora. Para garantir que os resultados tenham coerência entre si, foi feita uma comparação entre o Matlab e o Audacity, com o mesmo áudio, observando as frequências resultantes e a sua intensidade.

Figura 37 - Espectro de frequências do Audacity (esquerda) e Matlab (direita)



Fonte: O autor (2022).

Como é possível ver na Figura 37, os dois *softwares* fizeram a leitura do mesmo áudio, e o espectro de frequência é similar entre os dois. Na Tabela 1, é possível identificar as diferenças entre as intensidades demonstradas pelos dois softwares, explicitas de forma quantitativa.

O Audacity demonstra o espectro de frequência com os níveis de intensidade sonora que o áudio foi gravado, diferente do Matlab que resulta em um gráfico cuja nível de intensidade máximo do harmônico com maior intensidade é 0 dB. Portanto, os valores resultantes no Audacity foram transformados para estarem na mesma escala que o Matlab, possibilitando encontrar as diferenças de intensidade entre si.

Até o sexto harmônico, a diferença entre os dois softwares não chegou a 1 dB, sendo pouco notável pelo ouvido humano. O único desvio foi na intensidade do oitavo harmônico, que chegou a quase 7 dB, três vezes mais do que a próxima maior diferença na intensidade. Por ser um caso isolado, e tendo em vista a baixa diferença entre os outros harmônicos é possível dizer que os dois softwares efetuam a leitura do áudio de forma similar, confirmando os resultados gráficos apresentados, corroborando para a utilização em conjunto destes dois softwares.

Tabela 1 - Comparação entre as intensidades do Audacity e Matlab

Harmônico	Frequência (Hz)	Intensidade Audacity (dB)	Intensidade Matlab (dB)	Diferença (dB)
fo	329,63	0,00	0,00	0,00
1	659,26	-4,80	-5,20	0,40
2	988,89	-2,70	-3,20	0,50
3	1318,52	-11,50	-12,30	0,80
4	1648,15	-0,70	-1,10	0,40
5	1977,78	-23,20	-23,80	0,60
6	2307,41	-3,30	-4,10	0,80
7	2637,04	-26,10	-28,10	2,00
8	2966,67	-9,20	-15,82	6,62
9	3296,30	-43,20	-45,60	2,40

Fonte: O autor (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

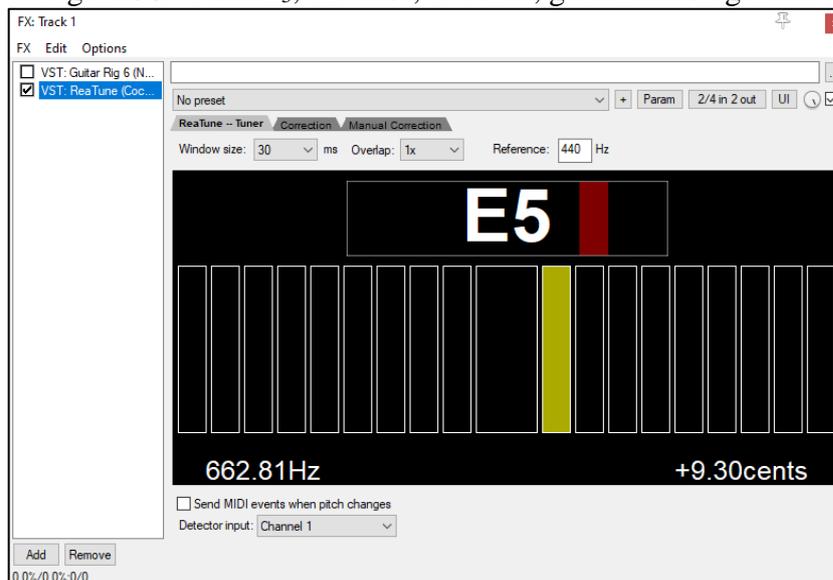
Após a conclusão de todas as análises, o último passo é a reunião dos resultados, entendendo o que cada um significa, comparando com a literatura técnica e concluindo se existe coerência entre os mesmos.

4.1 REGULAGEM DA GUITARRA

Para demonstrar a importância de uma regulagem antes de qualquer tipo de gravação, foi comparado as frequências entre a guitarra desregulada e regulada.

A nota escolhida para a comparação foi a Mi (E₅), posicionada na primeira corda, casa 12, cuja posição no braço da guitarra corresponde à metade do comprimento total da corda, entre ponte e pestana.

Figura 38 - Nota E₅, 12^a casa, 1^a corda, guitarra desregulada

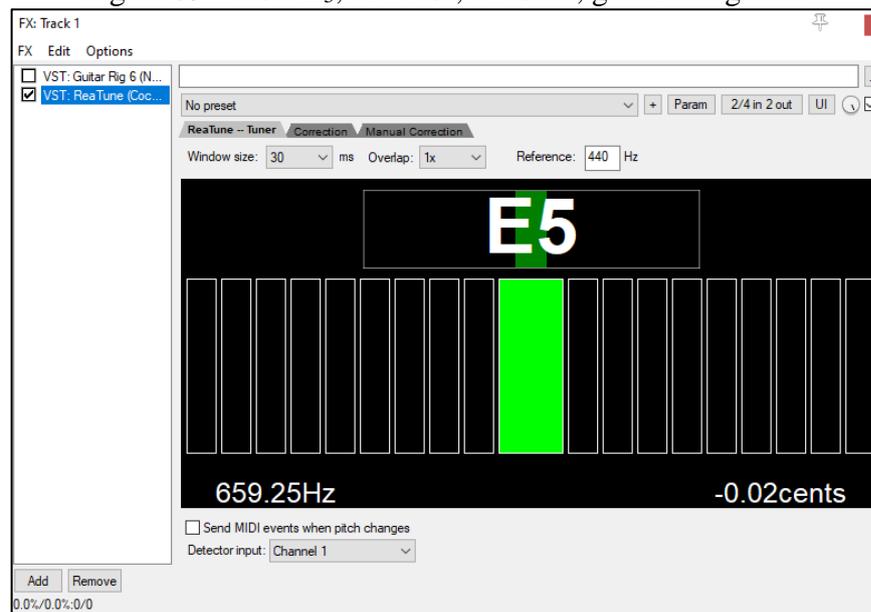


Fonte: O autor (2022).

Na Figura 38, pode-se ver a frequência resultante para a nota excitada na 12^a casa da guitarra desregulada, que ficou quase 4 Hz acima do *pitch* correto da nota E₅, que é de 659,26 Hz, causando uma notável diferença na sonoridade. Para as análises feitas, que são baseadas inteiramente nas frequências cujos *pitch* são exatos, este fato distorce os valores que deveriam ser encontrados, prejudicando os resultados. Segundo Bistafa (2011), o ouvido humano consegue perceber a diferença de 1 Hz. Assim, no caso da guitarra, essa é uma diferença nítida que qualquer pessoa conseguiria distinguir, principalmente músicos com o ouvido aguçado.

Já pela Figura 39 é possível ver a frequência da mesma nota após a guitarra ser regulada, seguindo os processos de regulagem descritos anteriormente. Como se vê, a guitarra ficou com a frequência esperada, não só para a nota da 12ª casa mostrada na Figura 39, mas também para todas as outras casas do braço, já que todas essas são afetadas pela regulagem. Portanto, obteve-se uma guitarra apta a executar as gravações desejadas, trazendo resultados precisos que representam com exatidão a realidade.

Figura 39 - Nota E₅, 12ª casa, 1ª corda, guitarra regulada



Fonte: O autor (2022).

4.2 FREQUÊNCIAS DE UMA MESMA CORDA PARA UM MESMO PITCH E DIFERENTES PONTOS DE EXCITAÇÃO

Nessa primeira análise, foi possível identificar a diferença entre os harmônicos excitados e suas intensidades, e quais suas influências na sonoridade do instrumento. A corda utilizada foi a de 0,010 pol, afinada na nota E₄, cujo *pitch* é de 329,63 Hz. Partindo disso, sabe-se que os harmônicos seguintes serão uma multiplicação desta frequência por números inteiros, visto na Tabela 2. Esta tabela se aplica também para as análises seguintes que forem feitas utilizando a nota E₄ como base.

Tabela 2 - Harmônicos e suas frequências para $f_0 = 329,63$ Hz (E₄)

Nº	Frequência (Hz)	Nº	Frequência (Hz)
1	659,26	14	4944,45
2	988,89	15	5274,08
3	1318,52	16	5603,71
4	1648,15	17	5933,34
5	1977,78	18	6262,97
6	2307,41	19	6592,60
7	2637,04	20	6922,23
8	2966,67	21	7251,86
9	3296,30	22	7581,49
10	3625,93	23	7911,12
11	3955,56	24	8240,75
12	4285,19	25	8570,38
13	4614,82	26	8900,01

Fonte: O autor (2022).

Para facilitar a visualização e a comparação das diferenças entre a posição de excitação e demais análises, foi utilizado o algoritmo desenvolvido no Matlab, contido no Apêndice E, que lê todos os áudios simultaneamente e os transforma em um gráfico de frequência por intensidade sonora.

Nas gravações, cada áudio resultou em valores de intensidade sonoras distintos, como vistos nos gráficos do Apêndice A. A distinção tem motivos na força que se excita a corda e também na distância do captador ao lugar que foi excitado. Esses fatos não interferem a sonoridade e a excitação dos harmônicos, mas para que seja possível proceder a análise, todos os áudios devem ficar na mesma escala. Isso posto, o gráfico do Matlab exibe o harmônico com maior intensidade sonora em 0 dB para cada gravação e os outros harmônicos com menor intensidade são nivelados a partir do harmônico mais intenso.

Nas gravações feitas, levando em conta a intensidade sonora que é audível ao ouvido humano, que é diferente de pressão sonora, a diferença entre o pico de intensidade sonora e a intensidade mais baixa que se foi possível ouvir ficou na faixa de -40 a -50 dB. Portanto o limiar inferior do gráfico foi escolhido de -45 dB. Os gráficos gerados no Audacity para cada posição de excitação individual estão localizados no Apêndice A, servindo de complemento a esta análise.

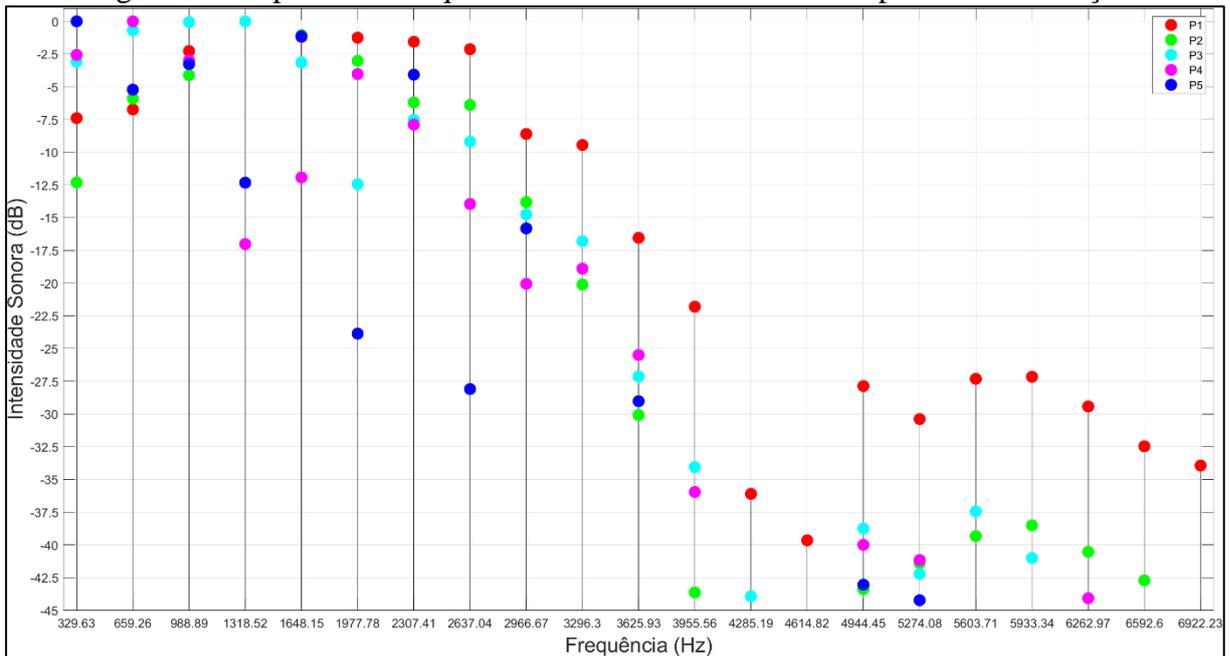
Pela Figura 40 se visualiza o espectro de frequências para as cinco posições de excitação, com seu pico de intensidade demonstrado por cada ponto e sua coloração.

Para a posição P1, percebe-se que a frequência fundamental possui uma intensidade sonora menor que os harmônicos subsequentes. No terceiro harmônico, que é quatro vezes a

frequência fundamental, se encontra o pico de intensidade sonora. Na faixa de frequências consideradas agudas, de 2 kHz até 7 kHz, a posição P1 é a que possui a maior dominância na intensidade dos harmônicos se comparado com as demais posições.

Por sua vez, na posição P2, a frequência fundamental possui intensidade menor que os sete harmônicos seguintes. A frequência com maior intensidade corresponde ao terceiro harmônico. Notou-se uma queda mais acentuada na intensidade a partir do nono harmônico.

Figura 40 - Espectro de frequências da nota E₄ em diferentes pontos de excitação



Fonte: O autor (2022).

Na posição P3 é possível verificar que a frequência fundamental e os três harmônicos seguintes possuem uma intensidade sonora muito próximas, porém o terceiro harmônico é o que possui a maior delas. A partir do quarto harmônico começa a diminuir a intensidade sonora em comparação com as posições P1 e P2.

A posição P4 demonstra que o primeiro harmônico é o que possui a maior intensidade sonora. Um outro fato é que na medida em que se aumentam os harmônicos, a intensidade vai diminuindo com uma taxa maior que as outras posições anteriores. Esta posição está aproximadamente a $\frac{1}{4}$ do comprimento total da corda. Um resultado relevante é que justamente a frequência correspondente a quatro vezes a frequência fundamental, no caso o terceiro harmônico, teve uma queda brusca na intensidade, voltando a subir nos harmônicos seguintes.

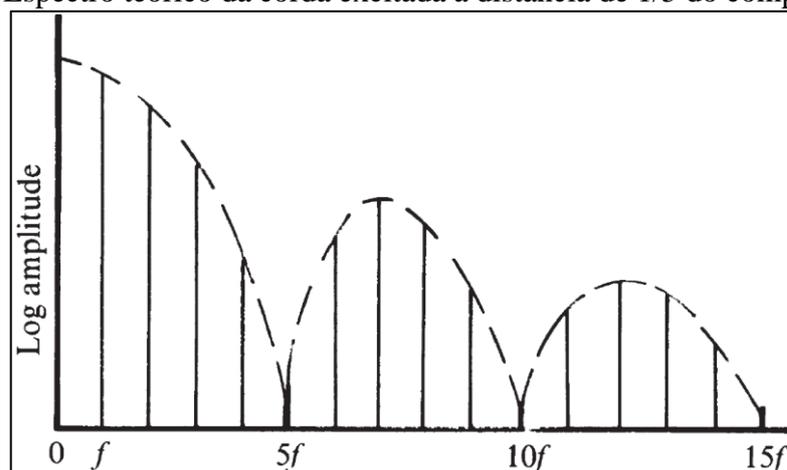
Por fim, a última posição excitada, a P5, está posicionada exatamente na metade do comprimento da corda. De plano, nota-se que a frequência fundamental é a que tem a maior

intensidade sonora. Neste caso, a corda foi excitada a uma distância de $\frac{1}{2}$ do comprimento total, ponte até pestana, então a frequência na qual a intensidade sonora será atenuada é o inverso do valor da distância excitada, que é $\frac{1}{2}$, resultando no dobro da frequência fundamental, correspondendo ao primeiro harmônico. O primeiro harmônico possui uma intensidade menor que o segundo. Além disto, os harmônicos que possuem frequência duas, três, quatro e cinco vezes este primeiro harmônico também obtiveram intensidades gradativamente menores que os harmônicos subsequentes.

A corda, quando excitada perto de uma extremidade engastada como a ponte, vibra de certa forma que os modos de vibração de cada harmônico não passam pelo ponto exato por onde a corda foi excitada. Em razão disso, certos harmônicos não sofrem diminuição na intensidade e nem são completamente atenuados.

No caso da posição P5, este fato é observado com mais facilidade, pois se excita a corda na metade do comprimento entre as extremidades. Assim todo o harmônico, cujo a forma de onda senoidal passe pela mesma localização que se é excitado, tem sua intensidade diminuída. No caso do primeiro harmônico, que possui o dobro da frequência fundamental, a onda passa no mesmo lugar que foi excitado. O terceiro, quinto, sétimo e nono harmônico, que são múltiplos pares da frequência fundamental, possuem frequências em que a senoide passa pelo ponto onde foi excitada a corda, resultando na atenuação das suas intensidades sonoras.

Figura 41 - Espectro teórico da corda excitada a distância de $\frac{1}{5}$ do comprimento total



Fonte: Fletcher (1991).

Comparando este fenômeno com a literatura, Fletcher (1991), afirma que este tipo de comportamento é esperado, de acordo com a Figura 41. Porém na teoria, o harmônico a $\frac{1}{5}$ do comprimento total não possui amplitude nenhuma, enquanto, na realidade, por uma série de fatores como a própria forma de excitar, espessura da corda, material da corda, tensão que a

corda sofre, o harmônico pode ter uma certa amplitude sonora, mas seguramente inferior aos harmônicos mais próximos.

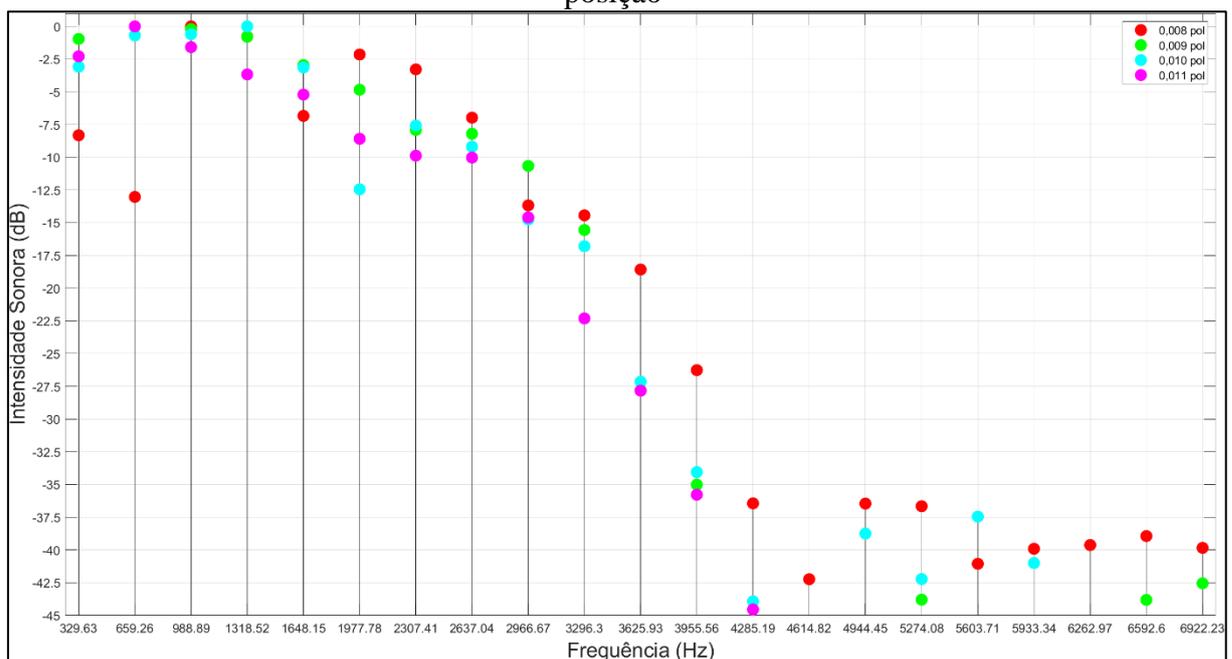
Desta forma, sabendo que os parâmetros, como tensão da corda, captador, posição dos potenciômetros de volume e tonalidade, não foram alterados, é possível concluir que quanto mais próximo de uma extremidade se excitar a corda, mais harmônicos nas frequências mais altas são gerados e também maiores são as intensidades sonoras desses harmônicos.

Portanto, a posição de excitação influencia diretamente na sonoridade da corda, deixando-a com características mais agudas ou mais graves, dependendo do lugar que é excitada. A posição de excitação auxilia o músico que deseja ter a sonoridade do seu instrumento com timbre distinto, enriquecendo assim a sua composição musical.

4.3 FREQUÊNCIAS DE UMA MESMA NOTA MUSICAL EM CORDAS DE DIFERENTES DIÂMETROS

Na análise anterior viu-se a clara diferença que a posição de excitação pode ter nas frequências geradas e, conseqüentemente, na sonoridade das cordas. Assim, nesta secção foi analisada somente a diferença de diâmetro utilizando-se apenas a primeira corda de cada jogo, excitadas somente na posição P3, conforme Figura 42, com gráficos complementares no Apêndice B. As cordas foram afinadas em E₄, na frequência de 329,63 Hz.

Figura 42 - Espectro de frequência para cordas de diferentes diâmetros, em uma mesma posição



Fonte: O autor (2022).

Para o diâmetro de 0,008 pol, que é a corda mais fina a ser analisada, foi possível verificar que a frequência fundamental e primeiro harmônico resultaram em uma intensidade significativamente menor que nos outros diâmetros. Além disto, na faixa de frequências de 2 kHz até 7 kHz, a corda de 0,008 pol possui praticamente todos os harmônicos com intensidades superiores que as outras cordas.

Na corda de 0,009 pol, visualizou-se que a frequência fundamental e os três primeiros harmônicos possuem intensidades muito similares, com o primeiro harmônico tendo uma leve predominância quanto a sua intensidade.

Para o espectro da corda de diâmetro 0,010 pol, a frequência fundamental possui intensidade menor que os três harmônicos seguintes. Os níveis da intensidade sonora são parecidos aos da corda 0,009 pol. O harmônico mais predominante quanto a sua intensidade é o terceiro.

A verificação do o espectro da corda de 0,011 pol evidenciou que o harmônico de maior intensidade é o primeiro, e é possível visualizar que a frequência fundamental tem uma intensidade menor que os três primeiros harmônicos.

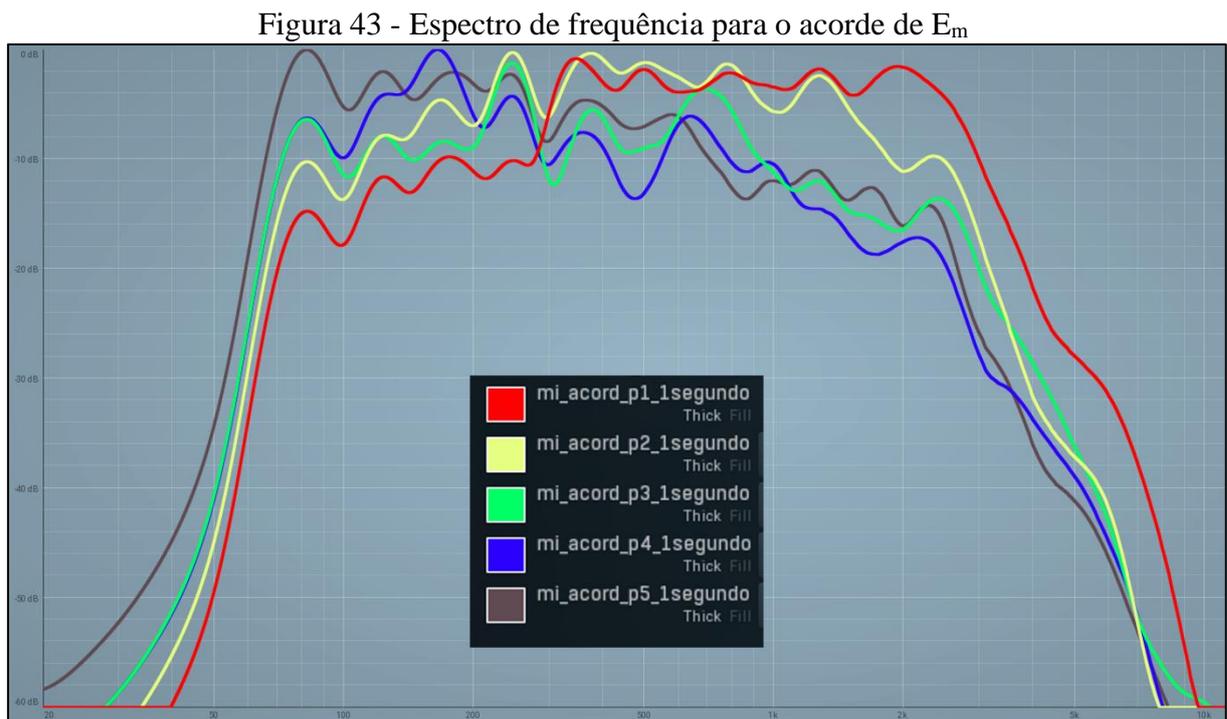
A comparação entre as cordas com os diâmetros de 0,009 pol, 0,010 pol e 0,011 pol, mostrou que as três possuem intensidades sonoras similares em vários harmônicos, o que corrobora com o escutado na prática, pois diferença de sonoridade por elas produzidas não possui grande distinção. Somente quando comparadas com a corda de 0,008 pol, que se tem uma diferença mais notável, tanto nos harmônicos de frequências mais altas quanto na sonoridade produzida.

Nessa análise, a única alteração foi no diâmetro da corda, o que também resultou em uma diferença nos harmônicos gerados. O incremento diâmetro da corda, mesmo que de forma pequena, notou-se que a quantidade de harmônicos gerados nas altas frequências diminuiu. Se a corda é mais espessa, aumenta sua massa e, conseqüentemente a sua rigidez. Como as quatro cordas foram afinadas no mesmo *pitch*, quanto mais espessa a corda, maior será sua tensão. De forma prática, cordas com maior diâmetro tendem a ter uma sonoridade que privilegia as frequências mais graves, enquanto as mais agudas são atenuadas.

4.4 FREQUENCIAS DE UM ACORDE EM DIFERENTES PONTOS DE EXCITAÇÃO

O acorde mais simples é composto por três notas, no caso de um acorde de E_m , tem-se as notas E, B e G. Este acorde foi tocado nas seis cordas da guitarra, então algumas notas serão repetidas com diferentes *pitch*. As frequências das notas do acorde, da sexta corda para a primeira são respectivamente: E_2 (82,41 Hz); B_2 (123,47 Hz); E_3 (164,81 Hz); G_3 (196,00 Hz); B_3 (246,94 Hz) e E_4 (329,63 Hz). (SUITS, 1998).

Em virtude do acorde possuir uma grande quantidade de harmônicos, provenientes da excitação das 6 cordas, a visualização das 5 posições diferentes de excitação foram combinadas em um mesmo gráfico, utilizando o MManalyzer, que gera uma linha contínua que percorre os picos, possibilitando um entendimento preciso para o caso desta análise do acorde, como visto na Figura 43. No Apêndice C contém os gráficos das posições individuais.



Fonte: O autor (2022).

Ao verificar a posição P1, percebeu-se que essa possui a maior intensidade dos harmônicos nas frequências mais agudas, quando comparada às outras posições, iniciando de 900 Hz e seguindo até 10 kHz. Os harmônicos na faixa de 80 Hz a 300 Hz possuem uma intensidade menor que os das outras posições, caracterizando uma sonoridade com características agudas.

A posição P2 está próxima da P1 quanto os harmônicos das frequências agudas, mas não tão intensa quanto, porque seus picos de intensidade estão nos harmônicos localizados entre as frequências de 200 Hz e 900 Hz. Sua sonoridade enaltece os médios e agudos.

Já a posição P3 possui um espectro de frequências que se tem harmônicos com intensidades parecidas ao longo das frequências, não possuindo uma diferença considerável nas amplitudes. Portanto, a sonoridade produzida é considerada equilibrada.

Quanto a posição P4, o seu harmônico mais intenso foi perto de 160 Hz, e sua curva demonstrou que se tem uma grande diminuição na intensidade dos harmônicos agudos, enquanto os graves são protuberantes, resultando em um som que privilegia as frequências graves e médias.

Ao final, tem-se a posição P5, em que analisando o gráfico, conclui-se que há uma atenuação nas frequências de 500 a 5 kHz se comparado com as outras posições. O harmônico com maior intensidade é o com a frequência fundamental do acorde, que é de 81 Hz. Portanto sua sonoridade resultante possui características graves.

Da mesma forma do que analisado no item 4.2, foi possível observar que mesmo para um acorde, a posição de excitação influencia nos harmônicos excitados e suas intensidades. Esta observação leva a conclusão que mesmo cordas de variadas espessuras também experenciam este fenômeno. Dependendo da espessura do jogo de corda utilizado, como visto no item 4.3, o incremento do diâmetro resulta em uma diminuição de harmônicos das frequências mais altas e suas intensidades.

4.5 FREQUÊNCIAS DE UMA MESMA NOTA MUSICAL EM DIFERENTES CORDAS DO MESMO JOGO

A última análise foi a das frequências para o mesmo *pitch*, unicamente nas cordas do jogo de 0,010 pol, utilizando a primeira, segunda, terceira, quarta e quinta corda, que são possíveis de produzir a nota E4 (329,63 Hz), cada uma em diferentes casas como visto anteriormente. A posição de excitação foi mantida a mesma, no caso a P3.

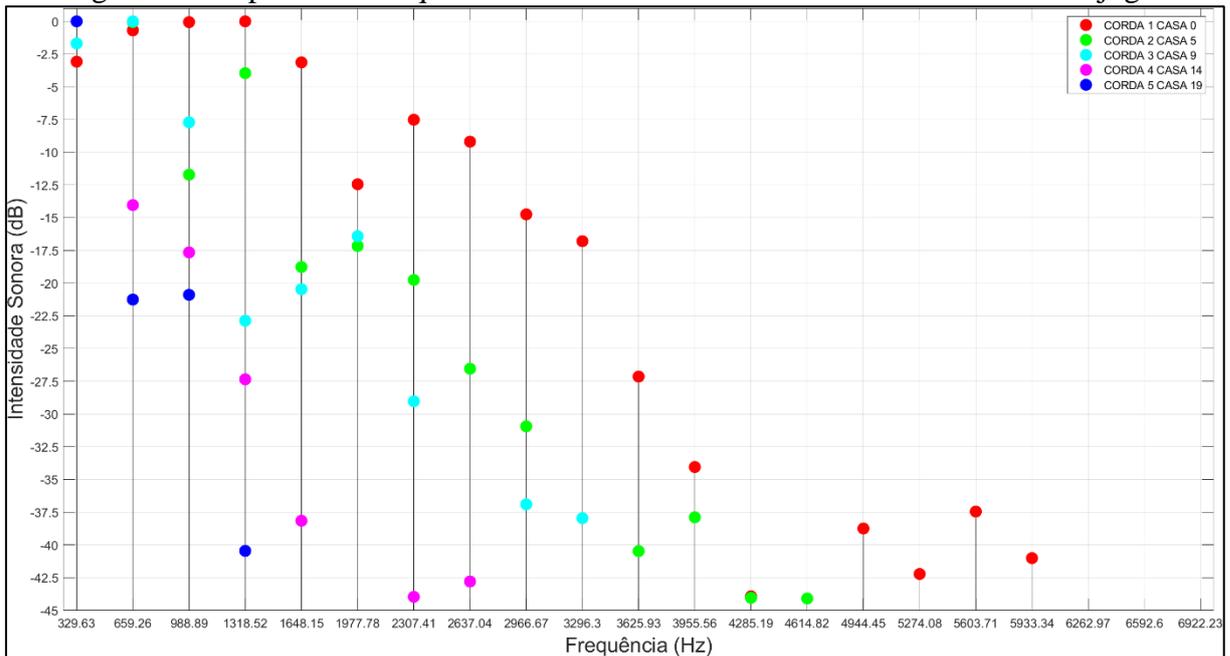
Na Figura 44 é possível ver o espectro resultante da excitação das cinco cordas, com uma discrepância entre as cordas quando referido aos harmônicos excitados e as intensidades encontradas. Pelo Apêndice D pode-se verificar o espectro de cada corda individualmente.

Para a primeira corda, é possível visualizar que do segundo harmônico em diante ela possui as maiores intensidades que as demais cordas, além de excitar um total de 16 harmônicos

dentro da faixa de intensidade sonora de 0 a -45 dB. A sonoridade proveniente dessa posição é a mais aguda entre as cinco.

A segunda corda possui harmônicos com menor intensidade que a primeira corda, menos para a frequência fundamental e o primeiro harmônico. Esses dois últimos resultaram na maior intensidade para esta corda. Isso confere à sonoridade um timbre com características mais graves, excitando uma quantidade de 13 harmônicos dentro da faixa do gráfico.

Figura 44 - Espectro de frequência da nota E₄ em 5 diferentes cordas do mesmo jogo



Fonte: O autor (2022).

A excitação da terceira corda, na maioria dos harmônicos resulta em valores de intensidade sonora inferiores se comparados a primeira e segunda corda. O primeiro harmônico foi o mais intenso. Observou-se que para esta corda foram excitados 8 harmônicos, quantidade essa inferior se comparado com a primeira e segunda corda.

Na quarta corda, penúltima que foi analisada, a nota E₄ está na 14^a casa. A frequência mais predominante é a fundamental, e com uma grande diminuição da intensidade sonora se tem o primeiro e o segundo harmônico. No total essa excitação produziu 6 harmônicos, todos eles com intensidades inferiores às outras cordas.

Como o braço da guitarra possui 22 trastes (22 casas), a última corda que possui a nota E₄ é a quinta, nota que extrai-se na 19^a casa do braço da guitarra. É possível visualizar que a frequência com a maior intensidade sonora é a fundamental, com uma diferença de 20 dB para o primeiro e segundo harmônico. No total foram excitados apenas 3 harmônicos com esta corda.

Da mesma maneira que se observou no item 4.3, à medida que se aumenta o diâmetro da corda, a sonoridade acaba ficando mais grave e com menos harmônicos excitados. Nesse caso para um mesmo *pitch*, a redução de harmônicos e queda de intensidade foi muito mais acentuada que na análise do item 4.3, por conta da proporção do aumento do diâmetro entre as cordas ter sido muito superior. Tocar a mesma nota em outras cordas e casas diferentes é uma excelente opção ao músico, incrementando a sua composição, com nuances sonoras diferentes para um mesmo *pitch*.

5 CONCLUSÕES

O músico sempre almeja buscar uma sonoridade que o caracteriza e o diferencia dos demais, seja pela sua forma de executar a música ou instrumento, equipamentos utilizados e também o talento musical obtido pelo músico. Quando isso se aplica à guitarra, existem algumas formas de alterar a sua sonoridade, por processos eletro-físicos como efeitos sonoros aplicados ao som, controles das frequências por meio de equalização, substituição de captadores e potenciômetros, e por processos de natureza puramente mecânica, que é o caso das cordas da guitarra.

Portanto, ao analisar somente os efeitos na sonoridade que a corda gera a partir da sua posição de excitação, percebeu-se de fato uma diferença no som, e conseqüentemente no espectro de frequências que cada lugar excitado gera. Quanto mais perto da extremidade se excita a corda, as frequências excitadas na região aguda são mais intensas, resultando em um som mais agudo, por outro lado, quanto mais próximo se excitar da metade da distância entre uma extremidade e a nota excitada, maior a quantidade de harmônicos que tem suas intensidades atenuadas, principalmente os das frequências agudas, resultando em frequências geradas com características mais graves.

Este fato acontece porque a distância que se excita a corda em relação ao comprimento interfere como a corda vibra, assim cada posição possui seu modo de vibração e suas amplitudes tanto no sentido longitudinal quanto no transversal da corda são diferentes, e a combinação destas gera o espectro de frequência específico para cada posição.

O diâmetro que a corda possui também interfere na sonoridade da corda, à medida que se aumenta o diâmetro da corda a sonoridade fica mais grave. O aumento da massa da corda faz aumentar a rigidez, alterando a forma de vibração da corda, diminuindo a quantidade de harmônicos gerados.

A alteração da intensidade dos harmônicos excitados é notável ao ouvido humano, assim a posição que se excita a corda é uma maneira rápida, e eficaz se se alterar a sonoridade da guitarra, por uma forma puramente mecânica. Este tipo de análise é benéfica para a indústria de cordas, pois as tecnologias embarcadas em processos de fabricação, utilização de tipos distintos de materiais para a corda e revestimento refletem diretamente como a corda soa, e o meio ideal de verificar de forma quantitativa é através da análise do espectro de frequências.

Sugere-se, como continuidade do trabalho, a avaliação influência do material utilizado nas cordas e do seu revestimento, no espectro de frequências, com o intuito de agregar na melhoria da sonoridade das cordas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 369 p. ISBN 9788521205814
- BUCUR, Voichita. **Handbook of materials for string musical instruments**. 1. ed. Melbourne: Springer, 2016. 975 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32080-9>
- D'ADDARIO. **Electric guitar strings**. c2022 Disponível em: <https://www.daddario.com/d2c/guitar/electric-guitar/xl-nickel/> Acesso em: 27 fev. 2022
- DAJBYCH, Oldrich. **Ultimate tensile strength of the string determination using spectral analysis**. TAE 2019 - Proceeding of 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2019, [s. l.], n. September, p. 113–116, 2019.
- ERNIE BALL. **Cordas para guitarra: Modelos de corda**. c2021. Disponível em: <https://www.ernieball.com.br/guitar-strings/electric-guitar-strings>. Acesso em: 17 out. 2021.
- FLETCHER, Neville H.; ROSSING, Thomas D. **The physics of musical instruments**. 1. ed. New York: Springer-Verlag, 1991, 620 p.
- FLETCHER, Neville H. **Materials for musical instrument**. Research School of Physical Sciences an Engineering, Canberra, v. 27. p. 1-9, 1999.
- GIBSON USA. **The custom collection**: Electronic catalog. c2018. Disponível em: https://guitar-compare.com/wp-content/uploads/2019/08/2001_Gibson_Custom_Collection.pdf. Acesso em: 29 out. 2021.
- GORE, Trevor. **Wood for guitars**. Proceedings of Meetings on Acoustics, [s. l.], v. 12, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.3610500>
- GUNTHER, Leon. **The physics of music and color: sound and light**. 2. ed. Suíça: Springer, 2019, 475 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-19219-8>
- HELMAN, Horácio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005. 260 p.
- HIBBLER, Russel Charles. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010, 641 p.
- HORTON, Nicholas G.; MOORE, Thomas R. **Modeling the magnetic pickup of an electric guitar**. American Journal of Physics, [s. l.], v. 77, n. 2, p. 144–150, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1119/1.2990663>
- JIM DUNLOP. **Stubby jazz pick 3.00 mm**, c2022. Disponível em: <https://www.jimdunlop.com/stubby-jazz-pick-3-00mm/> Acesso em: 15 mar. 2022.
- KEMP, Jonathan A. **The physics of unwound and wound strings on the electric guitar applied to the pitch intervals produced by tremolo/vibrato arm systems**. PLoS ONE, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 1–25, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184803>

- LAHDEVAARA, Jarmo. **The Science of Electric Guitar and Guitar Electronics**. [S. l.: s. n.], 2014. 615 p.
- MACDONALD, Raymond; HARGREAVES, David J.; MIELL, Dorothy. **Handbook of musical identities**. 1. ed. Reino Unido: Oxford University Press, 2017, 876 p.
- MED, Bohumil. **Teoria da música: vade mecum da teoria musical**. 5. ed, Brasília: Musimed, 1996, 423 p.
- MILLER, Michael. **The complete idiot's guide to music theory**. 2. ed. Indianapolis: Alpha books, 2005. 314 p.
- MOHAMAD, Zulfadhli; DIXON, Simon; HARTE, Christopher. **Pickup position and plucking point estimation on an electric guitar**. ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings, [s. l.], v. 3530, p. 651–655, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2017.7952236>
- PADILHA, Ângelo Fernando. **Materiais de engenharia: Microestruturas e propriedades**. 1. ed. Curitiba: Hemus, 2000, 349 p.
- POLAK, Robert D. et al. **Determining Young's modulus by measuring guitar string frequency**. The Physics Teacher, [s. l.], v. 56, n. 2, p. 122–123, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1119/1.5021447>
- RAO, Singiresu S. **Mechanical vibrations**. 6. ed. London: Pearson, 2018. 1147 p. ISBN 9781292178608
- REAPER. **Digital Audio Workstation**. c2022. Disponível em: <https://www.reaper.fm/>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- REZIĆ, Iva; ĆURKOVIĆ, Lidija; UJEVIĆ, Magdalena. **Study of microstructure and corrosion kinetic of steel guitar strings in artificial sweat solution**. Materials and Corrosion, [s. l.], v. 61, n. 6, p. 524–529, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/maco.200905368>
- REZIĆ, Iva; ĆURKOVIĆ, Lidija; UJEVIĆ, Magdalena. **Metal ion release from electric guitar strings in artificial sweat**. Corrosion Science, [s. l.], v. 51, n. 9, p. 1985–1989, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.018>
- ROSSING, Thomas D. **Modes of vibration of guitar plates with and without bracing**. The Journal of the Acoustical Society of America, [s. l.], v. 71, n. S1, p. S27–S27, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.2019304>
- ROSSING, Thomas D. **The science of string instruments**. 1. ed. New York: Springer, 2010. 470 p. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7110-4_2
- SCHAEFFER, Lírio. **Conformação mecânica**. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 167 p.
- STANCIU, Mariana Domnica; CURTU, Ioan; MOCANU, Teodor. **Mechanical behavior of guitar neck under simple bending stress analyzed with finite elements method**. Applied Mechanics and Materials, Switzerland, v. 658, p. 225–230, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.658.225>

SUITS, Bryan H. **Frequencies for equal-tempered scale, A4 = 440 Hz.** Physics department, Michigan Technological University. 1998. Disponível em: <http://www.phy.mtu.edu/~suits/notefreqs.html>. Acesso em: 26 set. 2021.

SUITS, Bryan H. **Scales: just vs equal-tempered.** Physics department, Michigan Technological University. 1998. Disponível em: <https://pages.mtu.edu/~suits/scales.html>. Acesso em: 26 set. 2021.

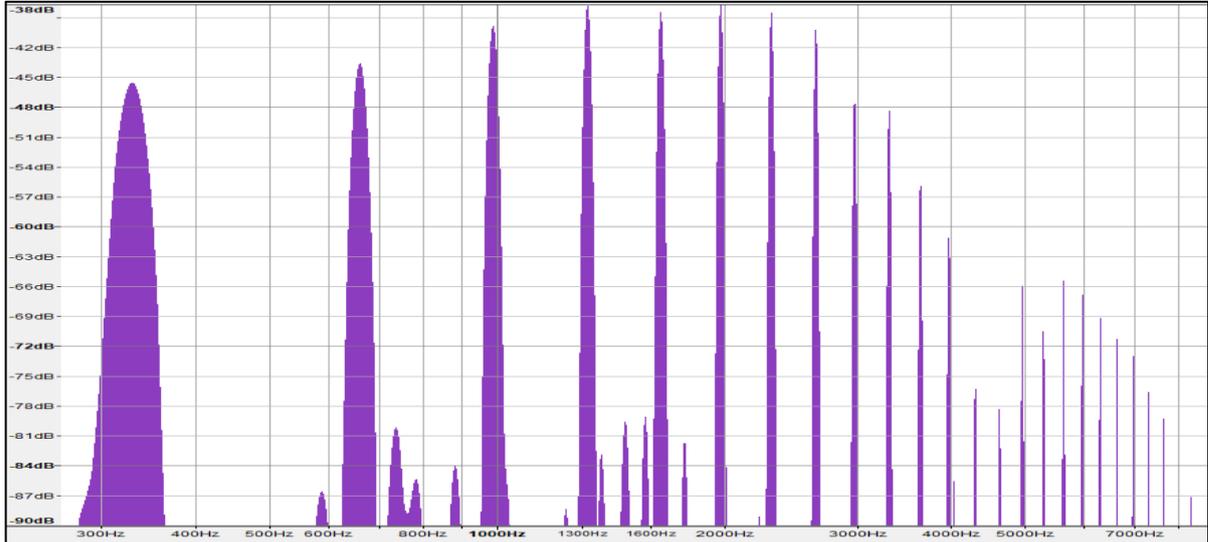
SX GUITARS. **Best valued guitars unbeatable for the money.** c2022 <http://sx-guitar.com/index.php/Products/detail/pid/26/id/143> Acesso em: 21 mar. 2022

TECNIFORTE CABLES. **The best cable ever.** c2022. Disponível em: <https://www.tecniforte.com.br/cabos-montados>. Acesso em: 10 mar. 2022.

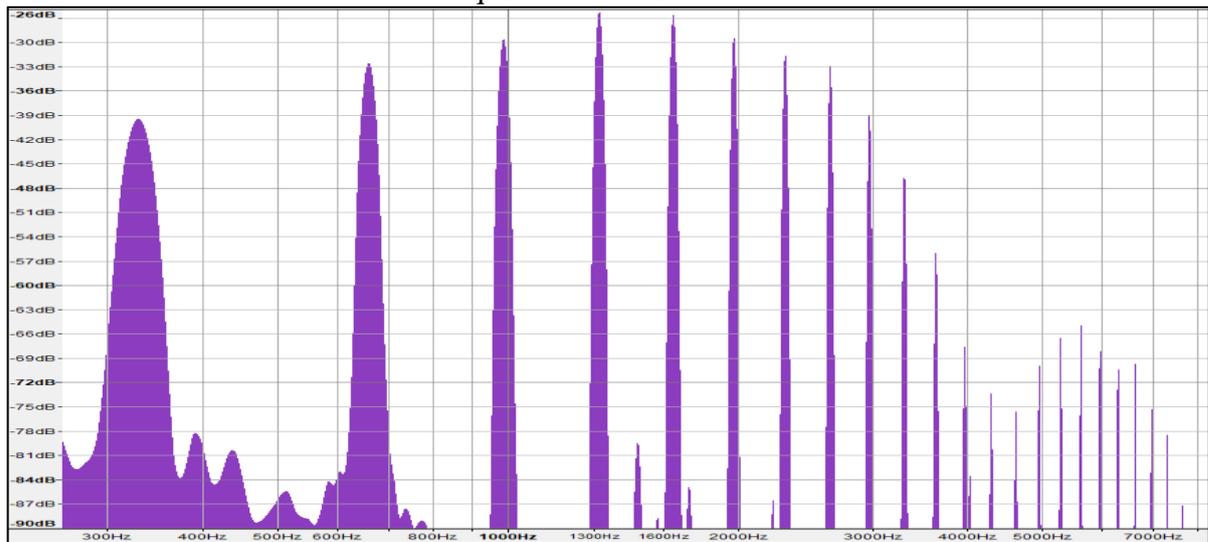
VOSOUGH, Sina. **Optimization and evaluation of crucial properties for stainless steel wire used as a guitar strings.** 2005. 90 f. Tese (Mestrado em Física) - Luleå University of Technology. Lulea, Suécia, 2005.

APÊNCIDE A – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DAS POSIÇÕES DE EXCITAÇÃO PARA A NOTA E4

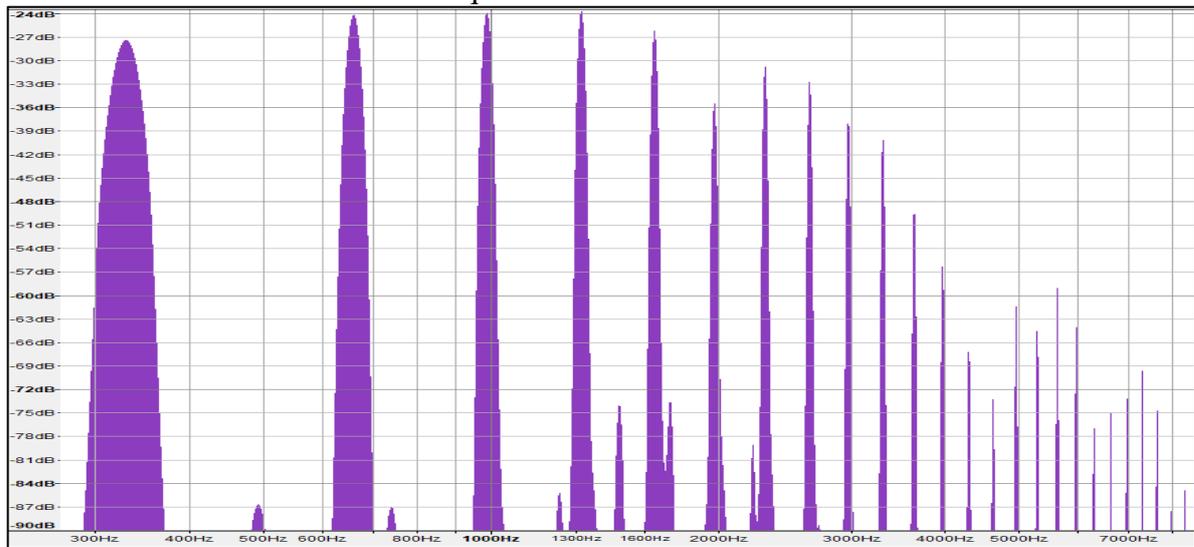
Frequência excitadas na P1



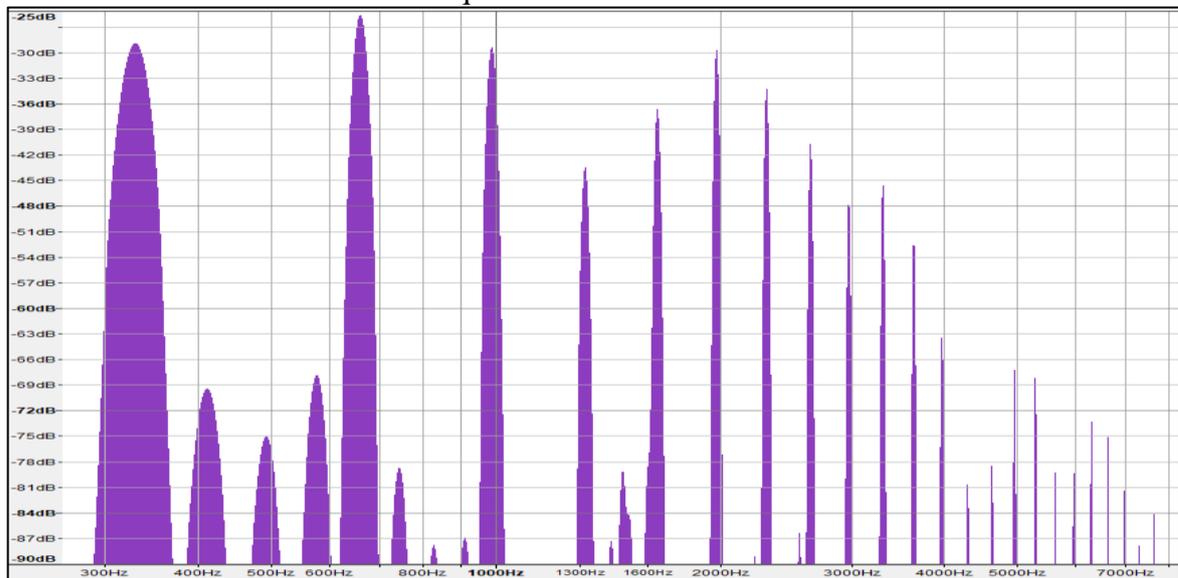
Frequências excitadas na P2



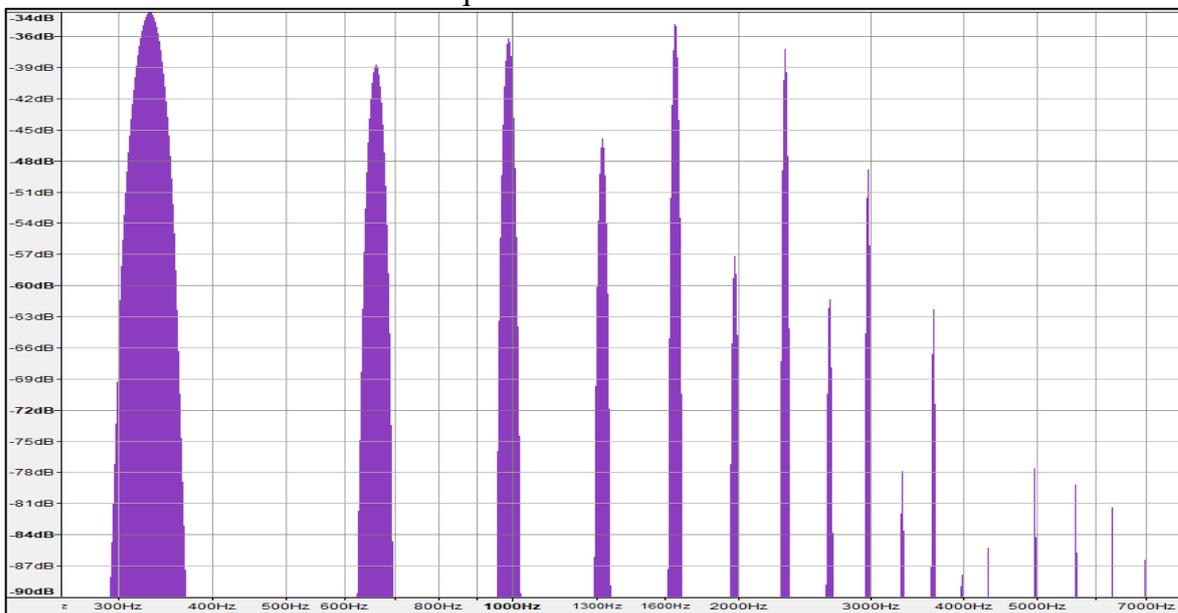
Frequências excitadas na P3



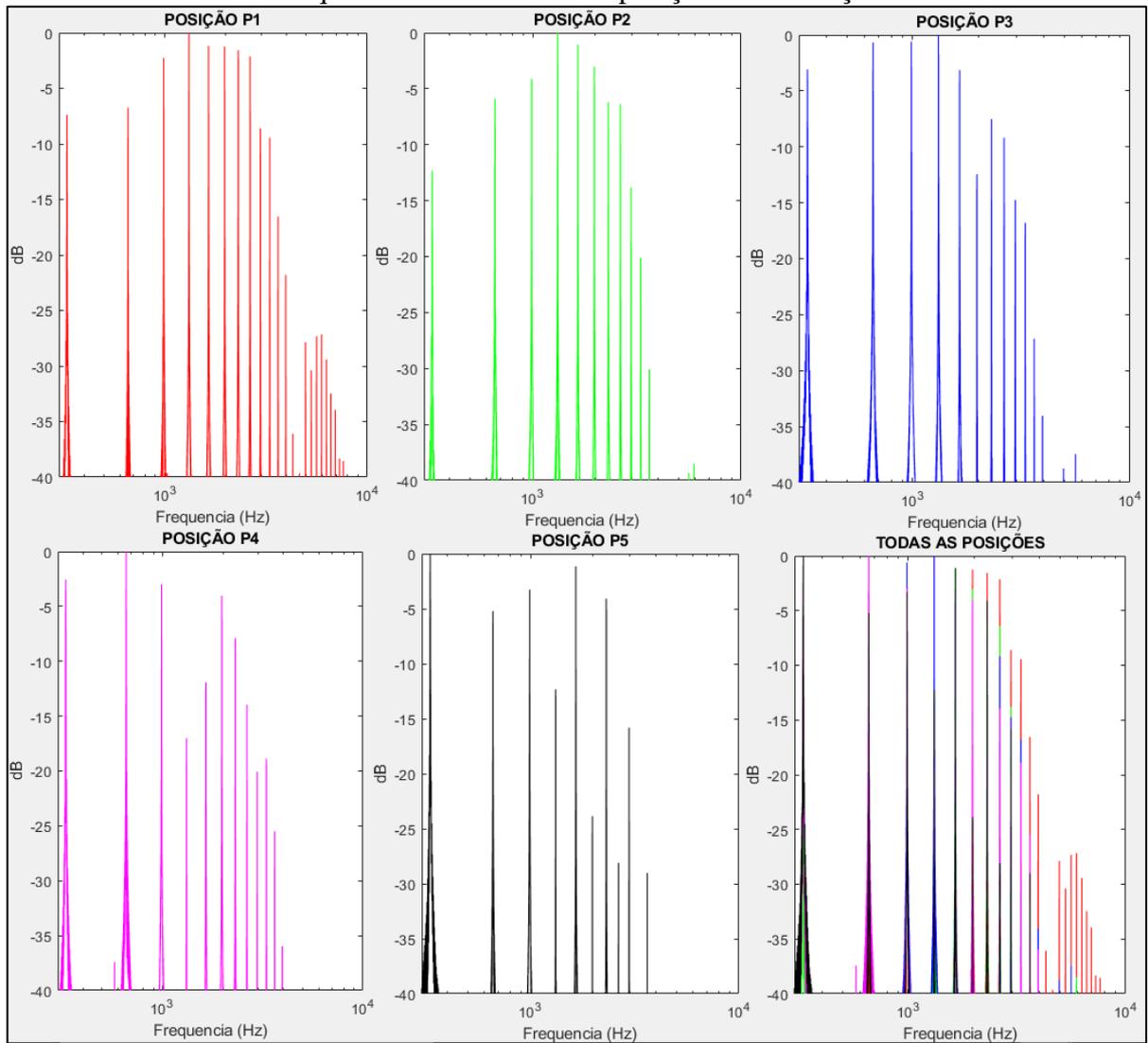
Frequências excitadas na P4



Frequências excitadas na P5

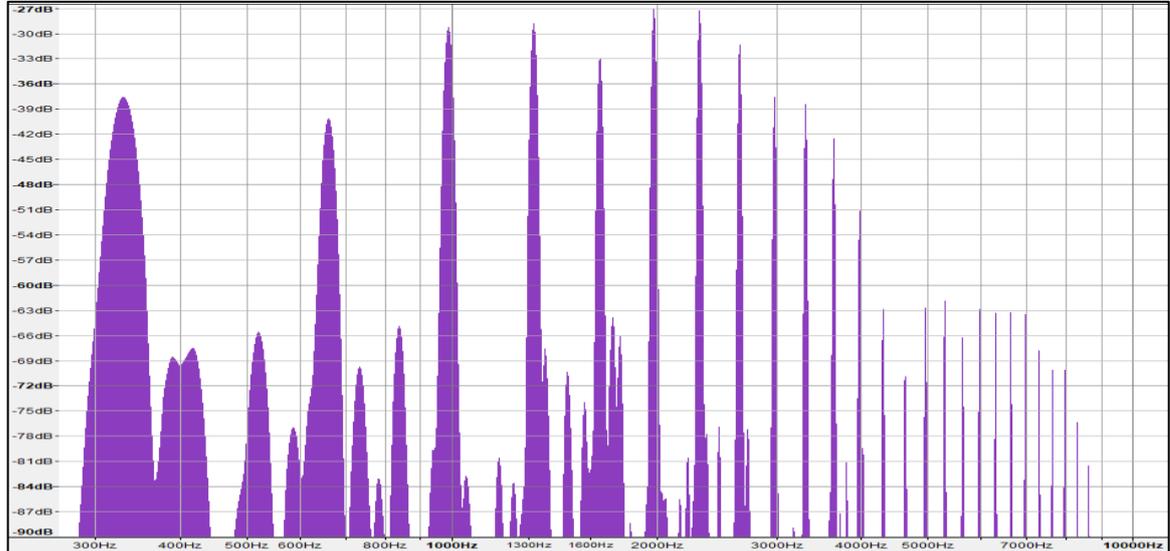


Frequências excitadas nas 5 posições de excitação

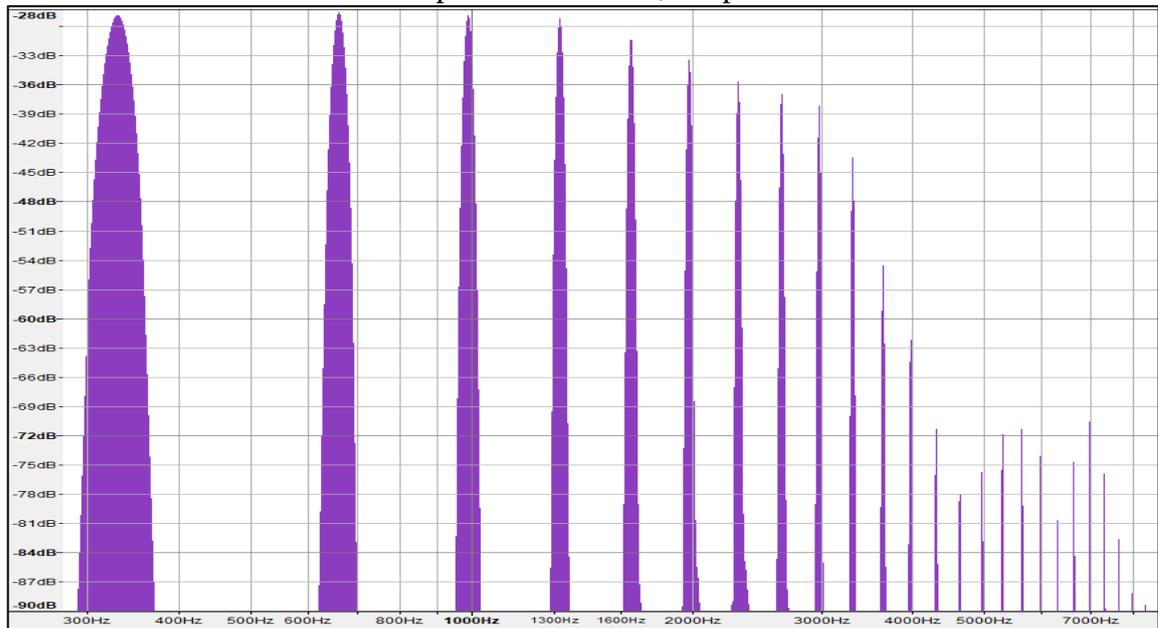


APÊNDICE B – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS PARA CORDAS DE DIFERENTES JOGOS PARA UMA MESMA POSIÇÃO E AFINAÇÃO

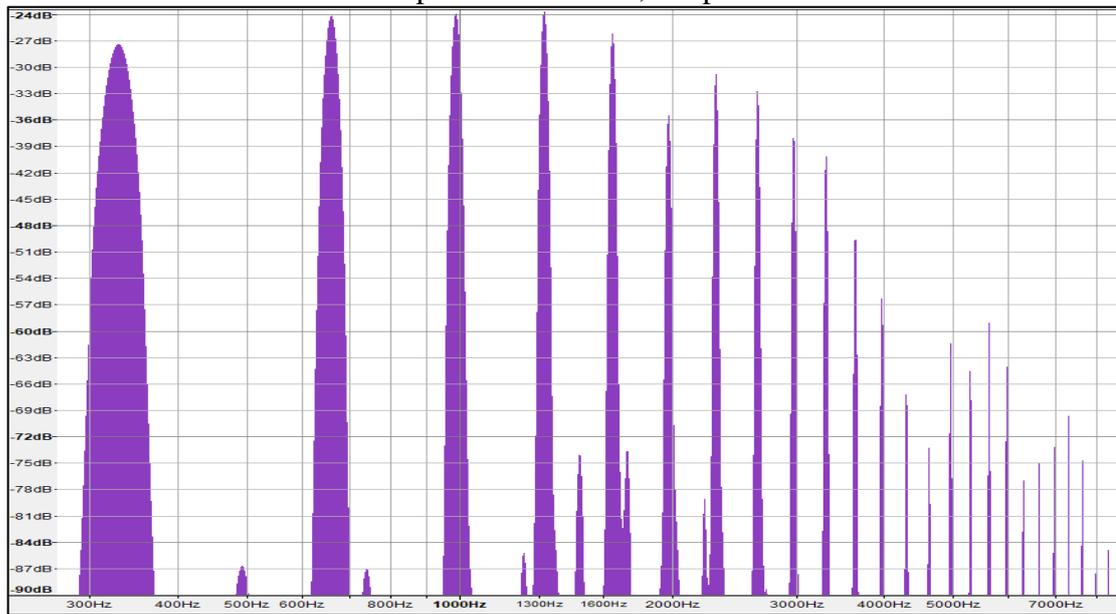
Espectro da corda 0,008 pol



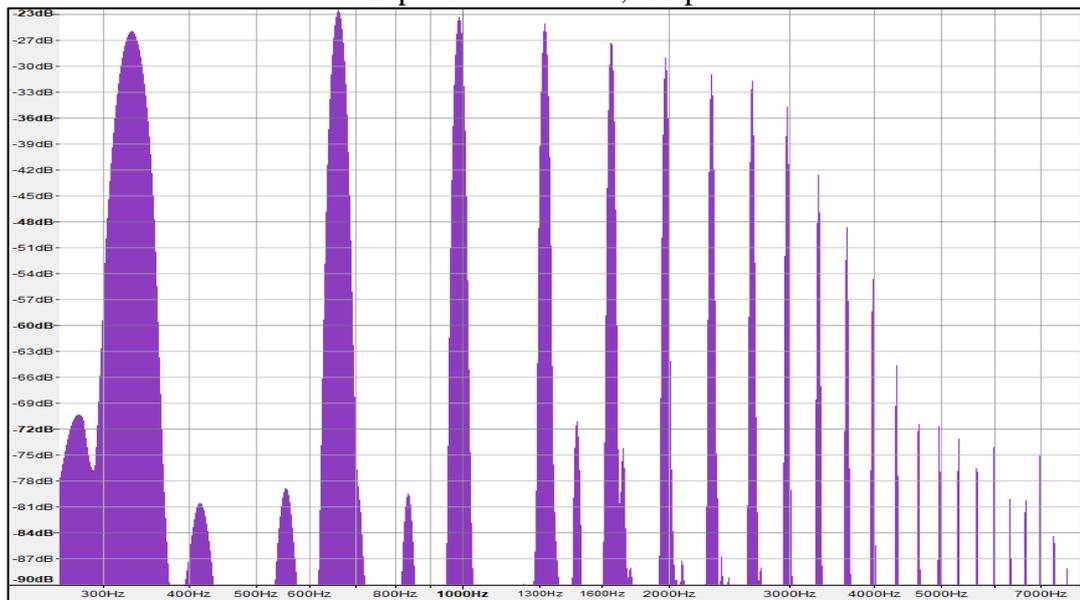
Espectro da corda 0,009 pol



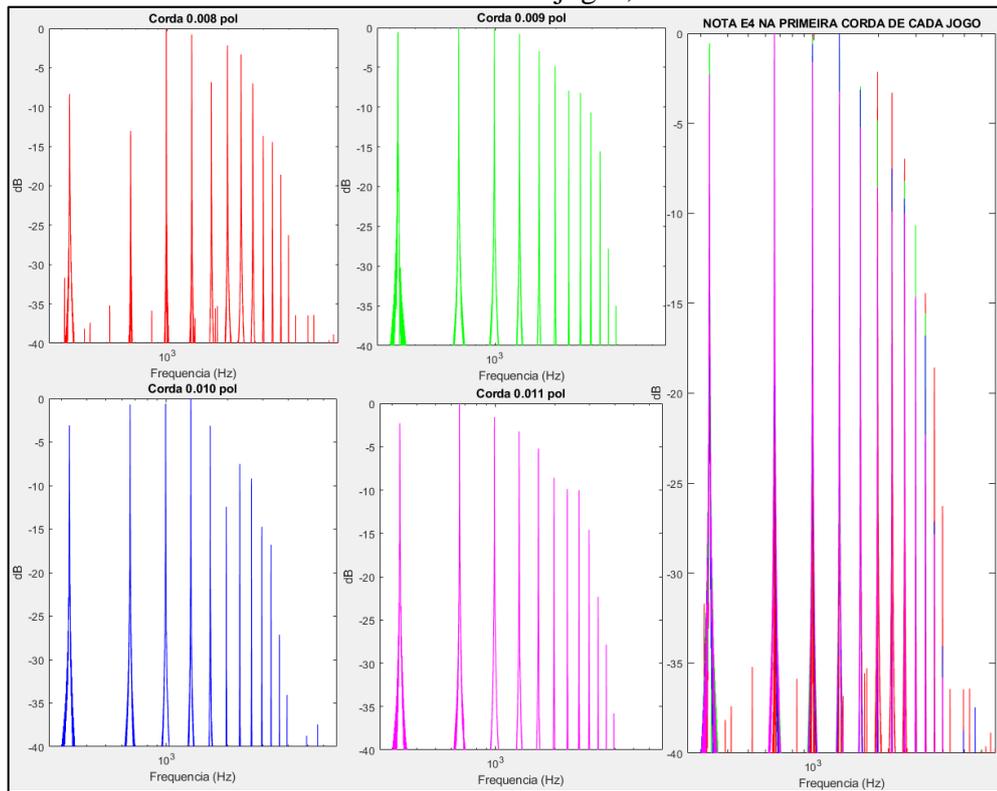
Espectro da corda 0,010 pol



Espectro da corda 0,011 pol

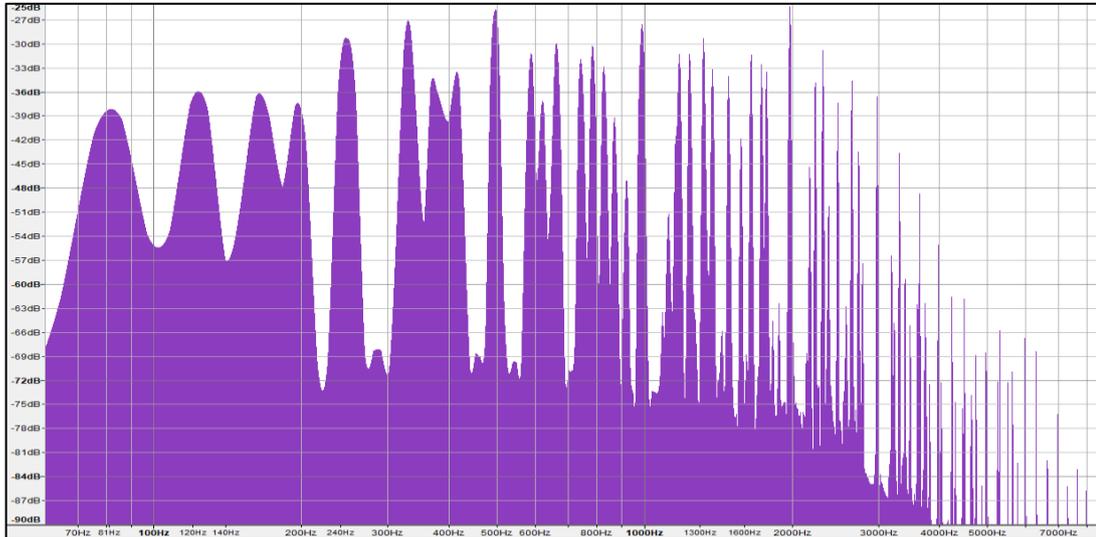


Primeira corda de diferentes jogos, afinada em E4

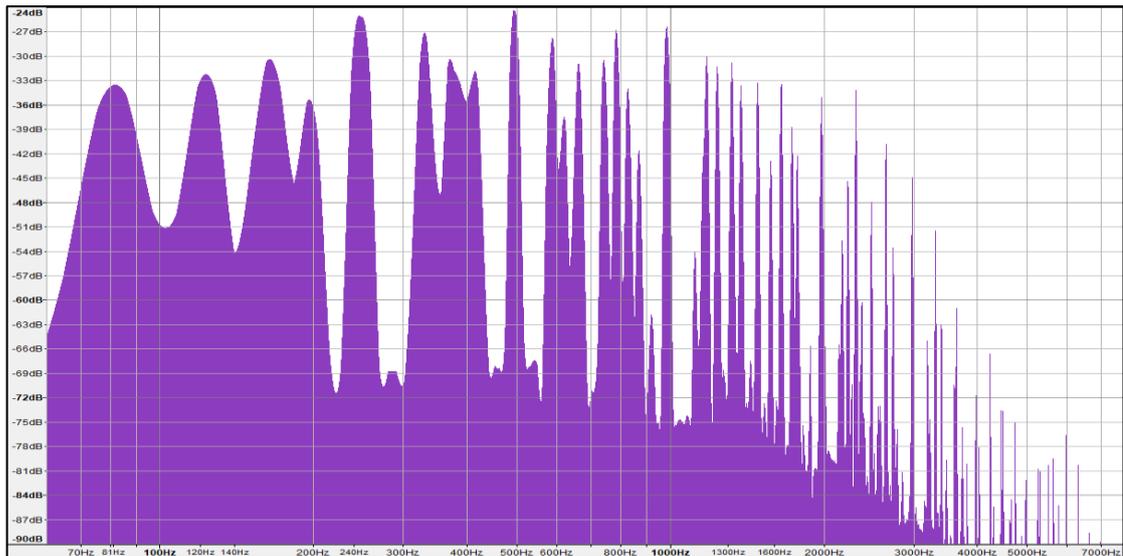


APÊNCIDE C – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS PARA O ACORDE DE EM NAS CINCO DIFERENTES POSIÇÕES DE EXCITAÇÃO

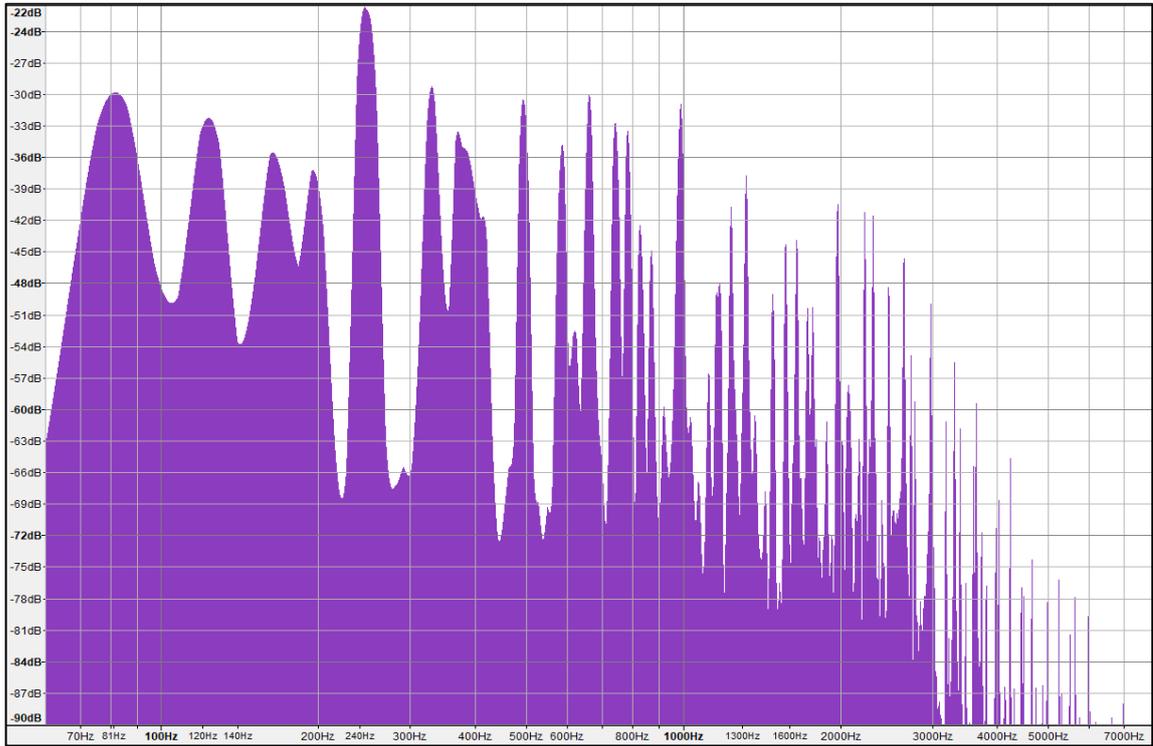
Acorde Em excitado na P1



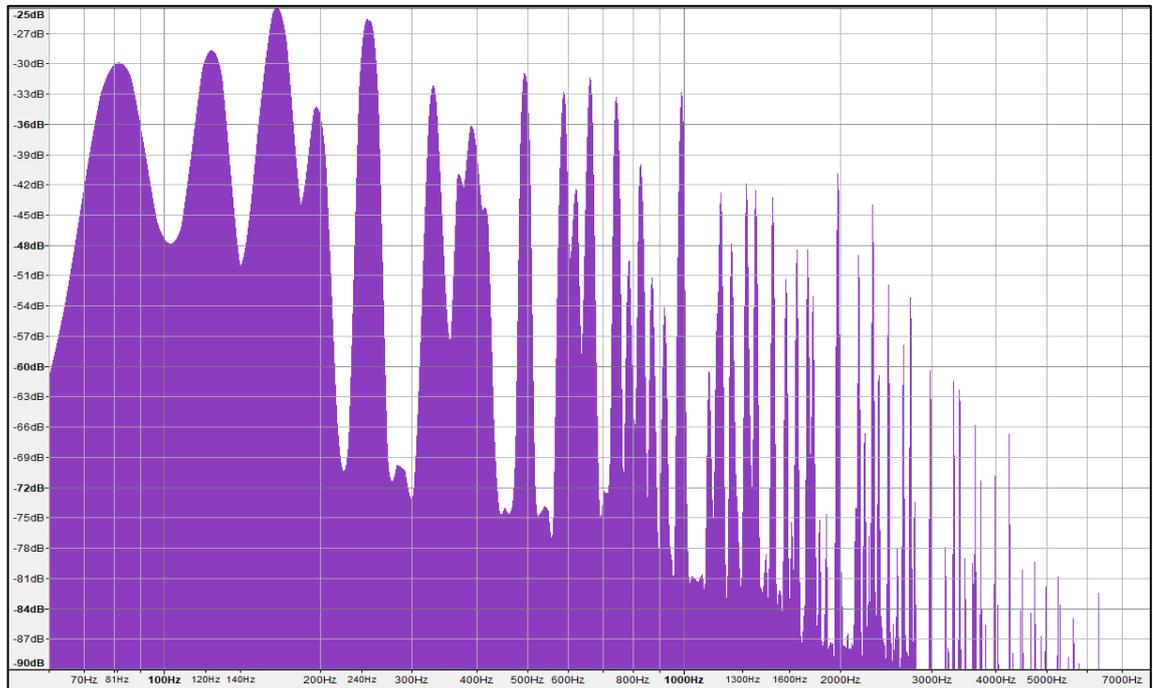
Acorde Em excitado na P2



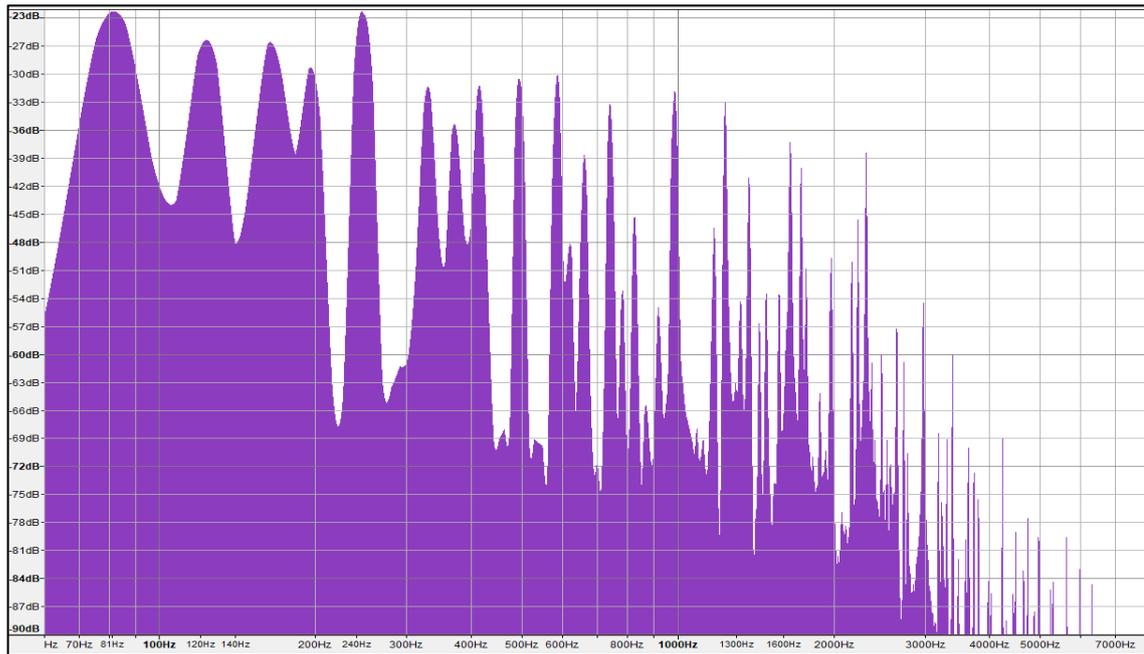
Acorde Em excitado na P3



Acorde Em excitado na P4

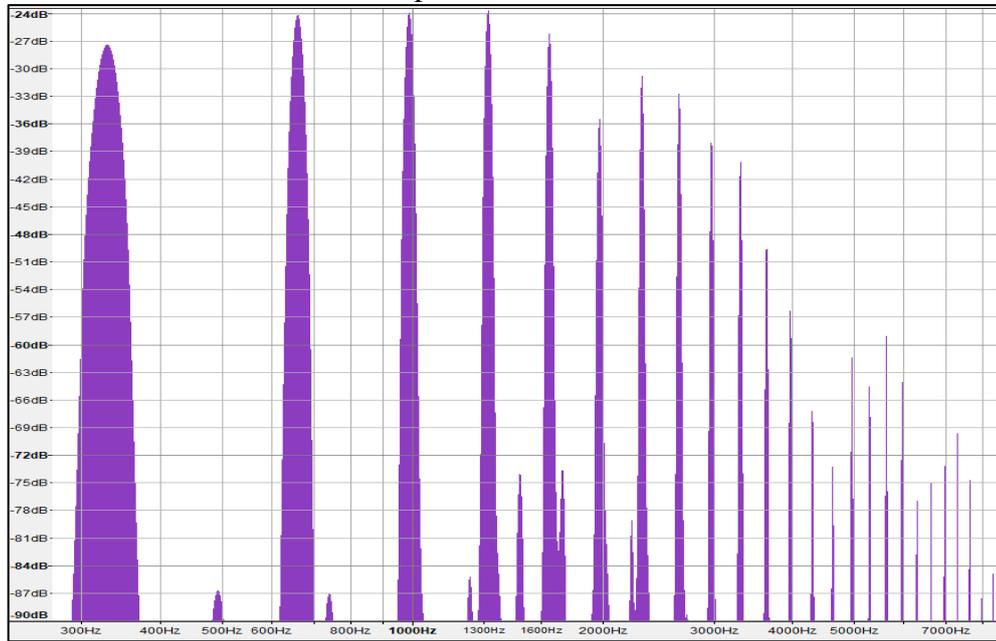


Acorde Em excitado na P5

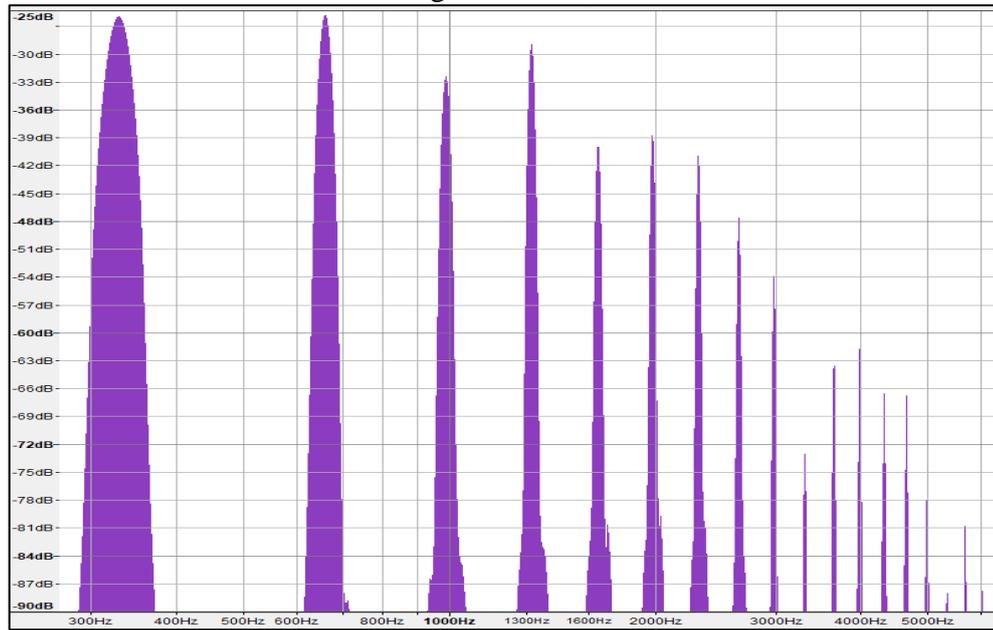


APÊNDICE D – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA NOTA E4 PARA CORDAS DE DIFERENTES DIÂMETROS DO MESMO JOGO

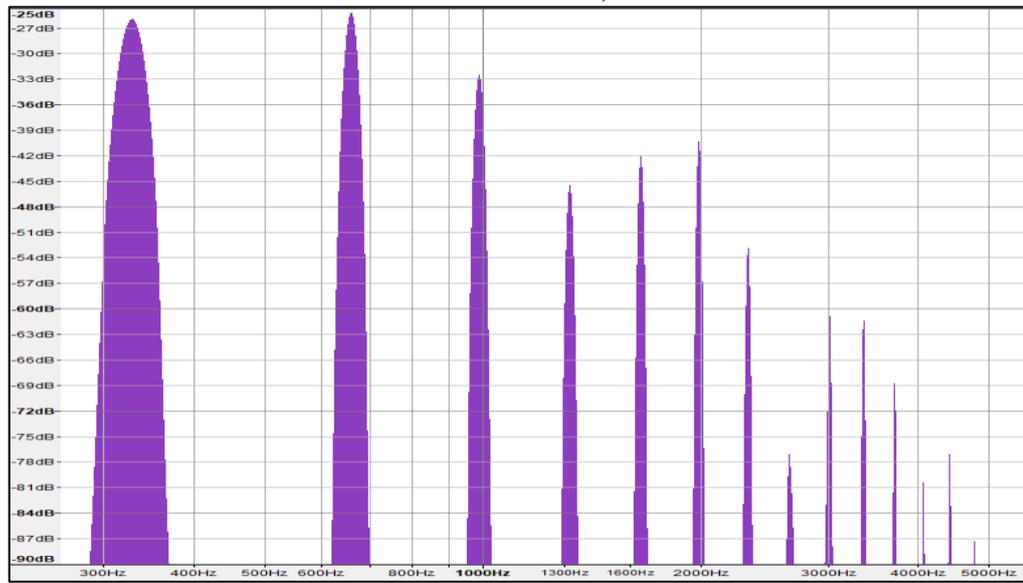
E4 na primeira corda, solta



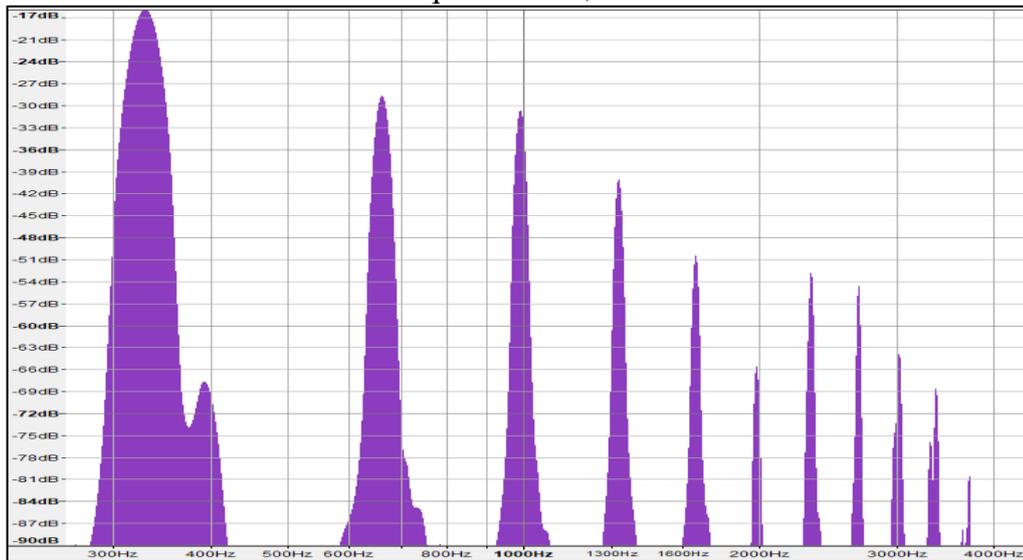
E4 na segunda corda, casa 5



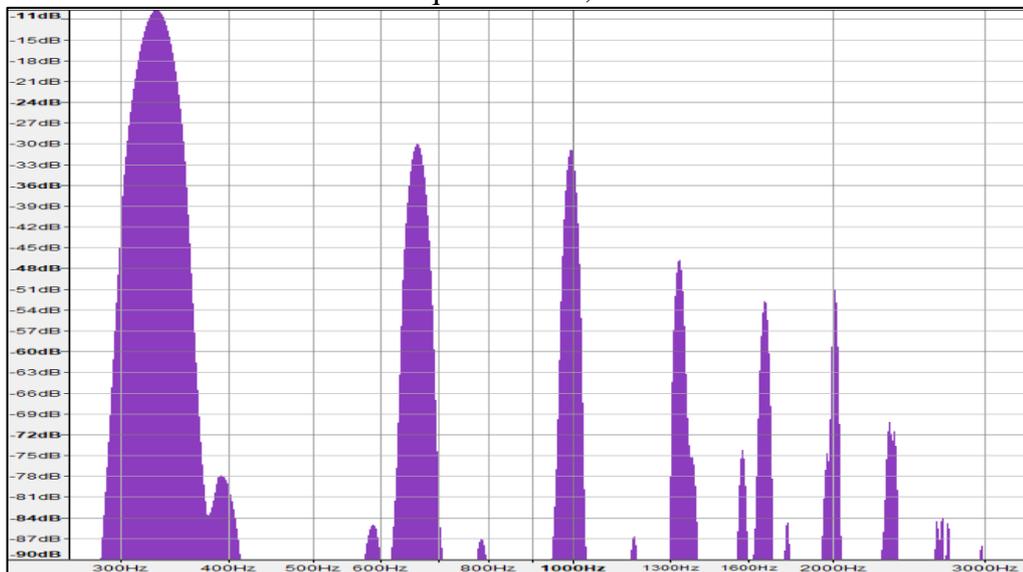
E4 na terceira corda, casa 9



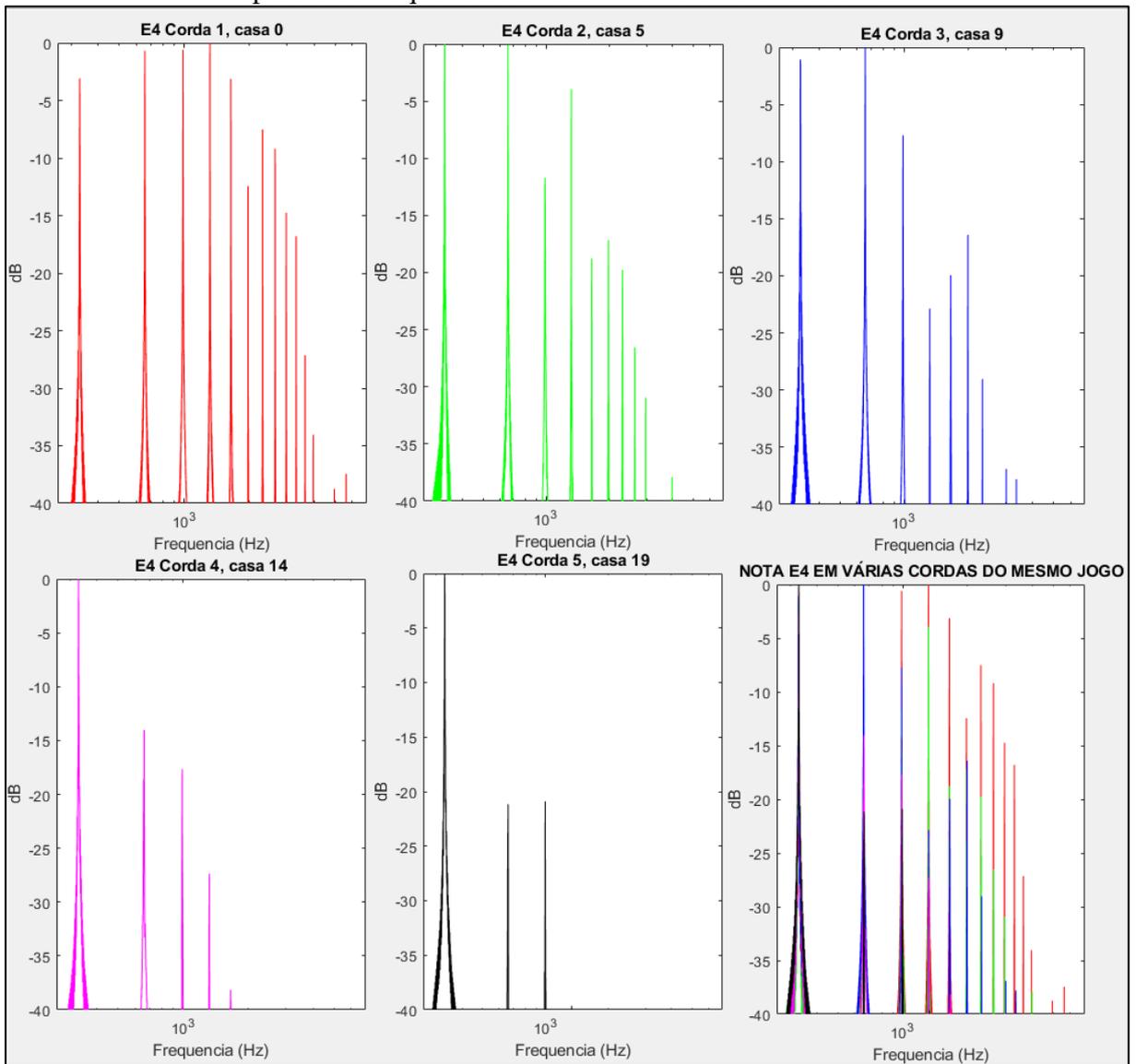
E4 na quarta corda, casa 14



E4 na quinta corda, casa 19



Espectro de frequência da nota E4 em 5 diferentes cordas



APÊNDICE E – ALGORITMO NO SOFTWARE MATLAB

```

function []=FOURIER_MATLAB_LUCCAS_DELGADO()
clear all; clc;

%% leitura de audio
[audio_lido,taxa_lida] =
audioread('mi_solto_p1_1segundo.wav');
tamanho_audio = length(audio_lido);
size_audio = size(audio_lido);
tempo_audio_segundos = tamanho_audio/taxa_lida ;
tempo_audio_minutos = tempo_audio_segundos / 60 ;

[audio_lido2,taxa_lida2] =
audioread('mi_solto_p2_1segundo.wav');
tamanho_audio2 = length(audio_lido2);
size_audio2 = size(audio_lido2);
tempo_audio_segundos2 = tamanho_audio2/taxa_lida2 ;
tempo_audio_minutos2 = tempo_audio_segundos2 / 60 ;

[audio_lido3,taxa_lida3] =
audioread('mi_solto_p3_1segundo.wav');
tamanho_audio3 = length(audio_lido3);
size_audio3 = size(audio_lido3);
tempo_audio_segundos3 = tamanho_audio3/taxa_lida3 ;
tempo_audio_minutos3 = tempo_audio_segundos3 / 60 ;

[audio_lido4,taxa_lida4] =
audioread('mi_solto_p4_1segundo.wav');
tamanho_audio4 = length(audio_lido4);
size_audio4 = size(audio_lido4);
tempo_audio_segundos4 = tamanho_audio4/taxa_lida4 ;
tempo_audio_minutos4 = tempo_audio_segundos4 / 60 ;

[audio_lido5,taxa_lida5] =
audioread('mi_solto_p5_1segundo.wav');
tamanho_audio5 = length(audio_lido5);
size_audio5 = size(audio_lido5);
tempo_audio_segundos5 = tamanho_audio5/taxa_lida5 ;
tempo_audio_minutos5 = tempo_audio_segundos5 / 60 ;

% tirar comentários e ponto e virgula para ver dados
tamanho_audio
size_audio;
taxa_lida
tempo_audio_segundos;
tempo_audio_minutos;
tamanho_audio2
size_audio2;
taxa_lida2

```

```

tempo_audio_segundos2;
tempo_audio_minutos2;
tamanho_audio3
size_audio3;
taxa_lida3
tempo_audio_segundos3;
tempo_audio_minutos3;
tamanho_audio4
size_audio4;
taxa_lida4
tempo_audio_segundos4;
tempo_audio_minutos4;
tamanho_audio5
size_audio5;
taxa_lida5
tempo_audio_segundos5;
tempo_audio_minutos5;

%% gráfico do audio_lido, completo
figure(6)
plot(audio_lido); hold on ;
plot(audio_lido2);
plot(audio_lido3);
plot(audio_lido4);
plot(audio_lido5);
xlabel('pontos');
grid on

%% criação do vetor tempo para audio lido.
TAXA = taxa_lida;
tf=tempo_audio_segundos;
L=tamanho_audio;
Dt=tf/(L-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da TAXA.
ti=0; % tempo inicial.
tlido=ti:Dt:tf; % vetor tempo.
Lt=length(tlido) % comprimento do vetor tempo.
Lt

TAXA2 = taxa_lida2;
tf2=tempo_audio_segundos2;
L2=tamanho_audio2;
Dt2=tf2/(L2-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da
TAXA.
ti2=0; % tempo inicial.
tlido2=ti2:Dt2:tf2; % vetor tempo.
Lt2=length(tlido2) % comprimento do vetor tempo.
Lt2

TAXA3 = taxa_lida3;
tf3=tempo_audio_segundos3;

```

```

L33=tamanho_audio3;
Dt3=tf3/(L33-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da
TAXA.
ti3=0; % tempo inicial.
tlido3=ti3:Dt3:tf3; % vetor tempo.
Lt3=length(tlido3) % comprimento do vetor tempo.
Lt3

TAXA4 = taxa_lida4;
tf4=tempo_audio_segundos4;
L4=tamanho_audio4;
Dt4=tf4/(L4-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da
TAXA.
ti4=0; % tempo inicial.
tlido4=ti4:Dt4:tf4; % vetor tempo.
Lt4=length(tlido4) % comprimento do vetor tempo.
Lt4

TAXA5 = taxa_lida5;
tf5=tempo_audio_segundos5;
L55=tamanho_audio5;
Dt5=tf5/(L55-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da
TAXA.
ti5=0; % tempo inicial.
tlido5=ti5:Dt5:tf5; % vetor tempo.
Lt5=length(tlido5) % comprimento do vetor tempo.
Lt5

%% gráfico do audio_lido no tempo
figure(7)
plot(tlido, audio_lido); hold on;
plot(tlido2, audio_lido2);
plot(tlido3, audio_lido3);
plot(tlido4, audio_lido4);
plot(tlido5, audio_lido5);
xlabel('tempo');
grid on

%% emissão sonora do vetor audio_lido
taxa_lida = 44100
taxa_lida2 = 44100
taxa_lida3 = 44100
taxa_lida4 = 44100
taxa_lida5 = 44100
%sound(audio_lido, taxa_lida)

%% seleção de partes do audio
% tamanho_bloco = taxa_lida;

```

```

% pos_inicial = 100000 ;
% num_blocos = 1;
% pos_final = pos_inicial-1 + num_blocos*tamanho_bloco;
% pos_final

%% definido pedaço do arquivo original, partel
% partel=audio_lido(pos_inicial:pos_final,1);
% partela=audio_lido(pos_inicial:pos_final,1);
% partelb=audio_lido(pos_inicial:pos_final,2);
% partel=partela+partelb; % mono
% parte3=audio_lido(pos_inicial:pos_final,:); % stereo
%sound(partel,taxa_lida)

% L_partel=length(partel)
% tempo_partel_segundos = L_partel/taxa_lida ;
% tempo_partel_minutos = tempo_partel_segundos / 60 ;
% tempo_partel_segundos
%
%
%partel=partel';
partel = audio_lido;
tempo_partel_segundos = tempo_audio_segundos;
L_partel= tamanho_audio;

partel2 = audio_lido2;
tempo_partel_segundos2 = tempo_audio_segundos2;
L_partel2= tamanho_audio2;

partel3 = audio_lido3;
tempo_partel_segundos3 = tempo_audio_segundos3;
L_partel3= tamanho_audio3;

partel4 = audio_lido4;
tempo_partel_segundos4 = tempo_audio_segundos4;
L_partel4= tamanho_audio4;

partel5 = audio_lido5;
tempo_partel_segundos5 = tempo_audio_segundos5;
L_partel5= tamanho_audio5;
% size(partel)
% taxa_lida

%% geração de parâmetros. criação do vetor tempo para parte do
audio
%TAXA = 44100; %posições por segundo.
TAXA = taxa_lida;
%tf=1;
tf=tempo_partel_segundos;
L=L_partel
Dt=tf/(L-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da TAXA.

```

```

ti=0; % tempo inicial.
t=ti:Dt:tf; % vetor tempo.
Lt=length(t) % comprimento do vetor tempo.
Lt

TAXA2 = taxa_lida2;
%tf=1;
tf2=tempo_parte1_segundos2;
L2=L_parte12
Dt2=tf2/(L2-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da
TAXA.

ti2=0; % tempo inicial.
t2=ti2:Dt2:tf2; % vetor tempo.
Lt2=length(t2) % comprimento do vetor tempo.
Lt2

TAXA3 = taxa_lida3;
%tf=1;
tf3=tempo_parte1_segundos3;
L3=L_parte13
Dt3=tf3/(L3-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da
TAXA.

ti3=0; % tempo inicial.
t3=ti3:Dt3:tf3; % vetor tempo.
Lt3=length(t3) % comprimento do vetor tempo.
Lt3

TAXA4 = taxa_lida4;
%tf=1;
tf4=tempo_parte1_segundos4;
L4=L_parte14
Dt4=tf4/(L4-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da
TAXA.

ti4=0; % tempo inicial.
t4=ti4:Dt4:tf4; % vetor tempo.
Lt4=length(t4) % comprimento do vetor tempo.
Lt4

TAXA5 = taxa_lida5;
%tf=1;
tf5=tempo_parte1_segundos5;
L5=L_parte15
Dt5=tf5/(L5-1); % tamanho do intervalo de tempo a partir da
TAXA.

ti5=0; % tempo inicial.
t5=ti5:Dt5:tf5; % vetor tempo.
Lt5=length(t5) % comprimento do vetor tempo.

```

Lt5

```

%% geração dos sinais

x1 = 0*sin(2*pi*20*t); % senoide.
x2 = 0*sin(2*pi*50*t); % senoide.
x3 = 0.5*sin(2*pi*220*t); % senoide.
x4 = 0.5*sin(2*pi*440*t); % senoide.
x5 = 0.5*sin(2*pi*1000*t); % senoide.
x6 = 0.5*sin(2*pi*5000*t); % senoide.
x7 = 0*sin(2*pi*10000*t); % senoide.
x10 = 0*sin(2*pi*20000*t);
x11 = partel1;

x12 = 0*sin(2*pi*20*t2); % senoide.
x22 = 0*sin(2*pi*50*t2); % senoide.
x32 = 0.5*sin(2*pi*220*t2); % senoide.
x42 = 0.5*sin(2*pi*440*t2); % senoide.
x52 = 0.5*sin(2*pi*1000*t2); % senoide.
x62 = 0.5*sin(2*pi*5000*t2); % senoide.
x72 = 0*sin(2*pi*10000*t2); % senoide.
x102 = 0*sin(2*pi*20000*t2);
x112 = partel2;

x13 = 0*sin(2*pi*20*t3); % senoide.
x23 = 0*sin(2*pi*50*t3); % senoide.
x33 = 0.5*sin(2*pi*220*t3); % senoide.
x43 = 0.5*sin(2*pi*440*t3); % senoide.
x53 = 0.5*sin(2*pi*1000*t3); % senoide.
x63 = 0.5*sin(2*pi*5000*t3); % senoide.
x73 = 0*sin(2*pi*10000*t3); % senoide.
x103 = 0*sin(2*pi*20000*t3);
x113 = partel3;

x14 = 0*sin(2*pi*20*t4); % senoide.
x24 = 0*sin(2*pi*50*t4); % senoide.
x34 = 0.5*sin(2*pi*220*t4); % senoide.
x44 = 0.5*sin(2*pi*440*t4); % senoide.
x54 = 0.5*sin(2*pi*1000*t4); % senoide.
x64 = 0.5*sin(2*pi*5000*t4); % senoide.
x74 = 0*sin(2*pi*10000*t4); % senoide.
x104 = 0*sin(2*pi*20000*t4);
x114 = partel4;

x15 = 0*sin(2*pi*20*t5); % senoide.
x25 = 0*sin(2*pi*50*t5); % senoide.
x35 = 0.5*sin(2*pi*220*t5); % senoide.
x45 = 0.5*sin(2*pi*440*t5); % senoide.
x55 = 0.5*sin(2*pi*1000*t5); % senoide.
x65 = 0.5*sin(2*pi*5000*t5); % senoide.
x57 = 0*sin(2*pi*10000*t5); % senoide.

```

```

x105 = 0*sin(2*pi*20000*t5);
x115 = parte15;

xr = 0*randn(size(t)); % sinal randômico.
xr2 = 0*randn(size(t2)); % sinal randômico.
xr3 = 0*randn(size(t3)); % sinal randômico
xr4 = 0*randn(size(t4)); % sinal randômico.
xr5 = 0*randn(size(t5)); % sinal randômico.

y=x11;
size(y)
y2=x112;
size(y2)
y3=x113;
size(y3)
y4=x114;
size(y4)
y5=x115;
size(y5)

%% gráfico do sinal y
figure(1); % figura 1
plot(t,y); hold on; % gráfico total de y(t).
plot(t2,y2); % gráfico total de y(t).
plot(t3,y3); % gráfico total de y(t).
plot(t4,y4); % gráfico total de y(t).
plot(t5,y5); % gráfico total de y(t).
grid on; % grade no gráfico.
xlabel('Tempo (s)'); % eixo x, tempo.
ylabel('Amplitude'); % eixo y, amplitude.

%% gráfico do sinal y reduzido
figure(2); % gráfico do sinal y(t) até a posição definida
pos= ?
pos = 100; % posição máxima do gráfico do vetor y reduzido.
mili = 1000; % para mostrar gráfico em milisegundo.
plot(mili*t(1:pos),y(1:pos), 'k'); hold on;

pos2 = 100; % posição máxima do gráfico do vetor y reduzido.
mili2 = 1000; % para mostrar gráfico em milisegundo.
plot(mili2*t2(1:pos2),y2(1:pos2), 'k');

pos3 = 100; % posição máxima do gráfico do vetor y reduzido.
mili3 = 1000; % para mostrar gráfico em milisegundo.
plot(mili3*t3(1:pos3),y3(1:pos3), 'k');

pos4 = 100; % posição máxima do gráfico do vetor y reduzido.
mili4 = 1000; % para mostrar gráfico em milisegundo.
plot(mili4*t4(1:pos4),y4(1:pos4), 'k');

```

```

pos5 = 100; % posição máxima do gráfico do vetor y reduzido.
mili5 = 1000; % para mostrar gráfico em milisegundo.
plot(mili5*t5(1:pos5),y5(1:pos5),'k'); grid on;

grid on;

title('Sinal com ruído')
xlabel('tempo (milisegundo)')

%% emissão sonora do vetor y
%y=partel
%sound(y,TAXA)
sound(y,taxa_lida)
sound(y2,taxa_lida2)
sound(y3,taxa_lida3)
sound(y4,taxa_lida4)
sound(y5,taxa_lida5)

% Evitar alterar a programação abaixo
%% FFT

Fs = 1/Dt+1; % frequencia de referência para
L = length(y); % comprimento do vetor y.
NFFT = 2^nextpow2(L); % potência de 2 mais próxima acima do
comprimento do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y = fft(y,NFFT)/L ; % transformada rápida de Fourier.
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); % eixo das frequências.

Fs2 = 1/Dt2+1; % frequencia de referência para
L2 = length(y2); % comprimento do vetor y.
NFFT2 = 2^nextpow2(L2); % potência de 2 mais próxima acima do
comprimento do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y2 = fft(y2,NFFT2)/L2 ; % transformada rápida de Fourier.
f2 = Fs2/2*linspace(0,1,NFFT2/2+1); % eixo das frequências.

Fs3 = 1/Dt3+1; % frequencia de referência para
L33 = length(y3); % comprimento do vetor y.
NFFT3 = 2^nextpow2(L33); % potência de 2 mais próxima acima do
comprimento do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y3 = fft(y3,NFFT3)/L33 ; % transformada rápida de Fourier.
f3 = Fs3/2*linspace(0,1,NFFT3/2+1); % eixo das frequências.

Fs4 = 1/Dt4+1; % frequencia de referência para
L4 = length(y4); % comprimento do vetor y.

```

```
NFFT4 = 2^nextpow2(L4); % potência de 2 mais próxima acima do
comprimento do vetor y.
```

```
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
```

```
Y4 = fft(y4,NFFT4)/L4 ; % transformada rápida de Fourier.
```

```
f4 = Fs4/2*linspace(0,1,NFFT4/2+1); % eixo das frequências.
```

```
Fs5 = 1/Dt5+1; % frequencia de referência para
```

```
L55 = length(y5); % comprimento do vetor y.
```

```
NFFT5 = 2^nextpow2(L55); % potência de 2 mais próxima acima do
comprimento do vetor y.
```

```
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
```

```
Y5 = fft(y5,NFFT5)/L55 ; % transformada rápida de Fourier.
```

```
f5 = Fs5/2*linspace(0,1,NFFT5/2+1); % eixo das frequências.
```

```
%% gráficos da FFT
```

```
figure(3) % figura 3
```

```
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1))); hold on; % gráfico do espectro
de frequencia.
```

```
plot(f2,2*abs(Y2(1:NFFT2/2+1)));
```

```
plot(f3,2*abs(Y3(1:NFFT3/2+1)));
```

```
plot(f4,2*abs(Y4(1:NFFT4/2+1)));
```

```
plot(f5,2*abs(Y5(1:NFFT5/2+1)));
```

```
grid on; % grade.
```

```
title('Amplitudes de y(t)')
```

```
xlabel('Frequencia (Hz)')
```

```
ylabel('|Y(f)|')
```

```
figure(4) % figura 4 gráfico escala logarítmica.
```

```
semilogx(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)),'r','LineWidth',6) ; hold on;
```

```
semilogx(f2,2*abs(Y2(1:NFFT2/2+1)),'b','LineWidth',4);
```

```
semilogx(f3,2*abs(Y3(1:NFFT3/2+1)),'g','LineWidth',1);
```

```
semilogx(f4,2*abs(Y4(1:NFFT4/2+1)),'y','LineWidth',2);
```

```
semilogx(f5,2*abs(Y5(1:NFFT5/2+1)),'k','LineWidth',2);
```

```
% gráfico do espectro de frequencia.
```

```
grid on; % grade.
```

```
title('Amplitudes de y(t)')
```

```
xlabel('Frequencia (Hz)')
```

```
ylabel('|Y(f)|')
```

```
%% GRAFICOS FFT Hz / dB
```

```
Ymod = 2*abs(Y(1:NFFT/2+1));
```

```
Ymin = min(Ymod);
```

```
Ymax = max(Ymod);
```

```
Ymin
```

```
Lp_Ymod = 10*log10(Ymod.^2/Ymin^2);
```

```
Lp_Ymodx = 10*log10(Ymod.^2/Ymax^2);
```

```
Ymod2 = 2*abs(Y2(1:NFFT2/2+1));
```

```

Ymin2 = min(Ymod2);
Ymax2 = max(Ymod2);
Ymin2
Lp_Ymod2 = 10*log10(Ymod2.^2/Ymin2^2);
Lp_Ymodx2 = 10*log10(Ymod2.^2/Ymax2^2);

Ymod3 = 2*abs(Y3(1:NFFT3/2+1));
Ymin3 = min(Ymod3);
Ymax3 = max(Ymod3);
Ymin3
Lp_Ymod3 = 10*log10(Ymod3.^2/Ymin3^2);
Lp_Ymodx3 = 10*log10(Ymod3.^2/Ymax3^2);

Ymod4 = 2*abs(Y4(1:NFFT4/2+1));
Ymin4 = min(Ymod4);
Ymax4 = max(Ymod4);
Ymin4
Lp_Ymod4 = 10*log10(Ymod4.^2/Ymin4^2);
Lp_Ymodx4 = 10*log10(Ymod4.^2/Ymax4^2);

Ymod5 = 2*abs(Y5(1:NFFT5/2+1));
Ymin5 = min(Ymod5);
Ymax5 = max(Ymod5);
Ymin5
Lp_Ymod5 = 10*log10(Ymod5.^2/Ymin5^2);
Lp_Ymodx5 = 10*log10(Ymod5.^2/Ymax5^2);

figure(5) % figura 5 gráfico escala logarítmica
% subplot(1,2,1) % limite inferior
% semilogx(f,Lp_Ymod,'r','LineWidth',5) ; hold on;
% semilogx(f2,Lp_Ymod2,'g','LineWidth',4);
% semilogx(f3,Lp_Ymod3,'b','LineWidth',3);
% semilogx(f4,Lp_Ymod4,'y','LineWidth',2);
% semilogx(f5,Lp_Ymod5,'k','LineWidth',1);
% grid on; % grade.
% title('Lp_Ymod dB')
% xlabel('Frequencia (Hz)')
% ylabel('dB')

% [maxymodx,imodx] = max(Lp_Ymodx); % valor maximo dentro do
vetor e seleciona a posição do valor máximo
% semilogx(f(1,imodx),maxymodx, 'or','LineWidth',0.1); hold
on;
% subplot(1,2,2)
% gera limite superior em 0 dB, alinha todos os gráficos pela
intensidade
% do harmônico mais protuberante
semilogx(f,Lp_Ymodx,'r','MarkerFaceColor',[1 0 0]); hold on;
semilogx(f2,Lp_Ymodx2,'g','MarkerFaceColor',[0 1
0], 'LineWidth',0.1);

```

```

semilogx(f3,Lp_Ymodx3,'b','MarkerFaceColor',[0 0
1],'LineWidth',0.1);
semilogx(f4,Lp_Ymodx4,'y','MarkerFaceColor',[1 1
0],'LineWidth',0.1);
semilogx(f5,Lp_Ymodx5,'k','MarkerFaceColor',[0 0
0],'LineWidth',0.1);
grid on; % grade.
title('Nota E4 em diferentes posições de excitação')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('dB')
xlim([300 10000])
ylim([-40 2])

figure(8)
subplot(3,2,1)
semilogx(f,Lp_Ymodx,'r','MarkerFaceColor',[1 0 0]); hold on;
xlim([300 10000])
ylim([-40 0])
title('POSIÇÃO P1')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('dB')

subplot(3,2,2)
semilogx(f2,Lp_Ymodx2,'g','MarkerFaceColor',[0 1
0],'LineWidth',0.1);
xlim([300 10000])
ylim([-40 0])
title('POSIÇÃO P2')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('dB')

subplot(3,2,3)
semilogx(f3,Lp_Ymodx3,'b','MarkerFaceColor',[0 0
1],'LineWidth',0.1);
xlim([300 10000])
ylim([-40 0])
title('POSIÇÃO P3')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('dB')

subplot(3,2,4)
semilogx(f4,Lp_Ymodx4,'m','MarkerFaceColor',[1 1
0],'LineWidth',0.1);
xlim([300 10000])
ylim([-40 0])
title('POSIÇÃO P4')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('dB')

subplot(3,2,5)

```

```
semilogx(f5,Lp_Ymodx5,'k','MarkerFaceColor',[0 0
0],'LineWidth',0.1);
xlim([300 10000])
ylim([-40 0])
title('POSIÇÃO P5')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('dB')

subplot(3,2,6)
semilogx(f,Lp_Ymodx,'r','MarkerFaceColor',[1 0 0]); hold on;
semilogx(f2,Lp_Ymodx2,'g','MarkerFaceColor',[0 1
0],'LineWidth',0.1);
semilogx(f3,Lp_Ymodx3,'b','MarkerFaceColor',[0 0
1],'LineWidth',0.1);
semilogx(f4,Lp_Ymodx4,'m','MarkerFaceColor',[1 1
0],'LineWidth',0.1);
semilogx(f5,Lp_Ymodx5,'k','MarkerFaceColor',[0 0
0],'LineWidth',0.1);
xlim([300 10000])
ylim([-40 0])
title('TODAS AS POSIÇÕES')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('dB')
end
```