

O amortecimento das vibrações em dois instrumentos de cordas dedilhadas: violão e viola caipira

Damping vibrations in two plucked string instruments: guitar and brazilian viola

Matheus da Silva Silos¹, Maria Lúcia Grillo Perez Baptista^{*1},
Luiz Roberto Perez Lisbôa Baptista¹

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Laboratório de Acústica Ambiental e Musical – Lacustamm, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido em 29 de maio de 2025. Revisado em 11 de junho de 2025. Aceito em 13 de junho de 2025.

O violão e a viola caipira são instrumentos muito conhecidos no Brasil e podem facilmente ser usados no ensino de Física e na divulgação científica. Diversos fenômenos físicos têm sido pesquisados, principalmente no violão, como a propagação de ondas em cordas, a ressonância, a formação de ondas estacionárias. Uma das propriedades físicas é o amortecimento das vibrações, que pode ser estudado de diversas formas: considerando a percepção dos ouvintes (quanto mais tempo o som se mantém, menor é o amortecimento), fazendo medições de níveis sonoros, formas de onda ou coeficientes de amortecimento. Neste trabalho medimos o coeficiente de amortecimento de um violão e de uma viola caipira, utilizando o método do decremento logarítmico. Os resultados mostraram que o amortecimento, em ambos os instrumentos, é maior em frequências abaixo de 300 Hz e que a viola caipira, em média, apresenta amortecimentos menores, o que está de acordo com a percepção dos ouvintes. O estudo das vibrações é importante em cursos de Física e de Engenharias. Apresentamos então uma aplicação motivadora desse estudo. O trabalho é inovador por comparar o violão com a viola caipira.

Palavras-chave: Instrumento de cordas dedilhadas, vibrações, amortecimento, decremento logarítmico.

The guitar and the brazilian viola are well-known instruments in Brazil and can easily be used in Physics teaching and scientific dissemination. Several physical phenomena have been researched, mainly in the guitar, such as wave propagation in strings, resonance, and the formation of standing waves. One of the physical properties is the damping of vibrations, which can be studied in several ways: considering the listeners' perception (the longer the sound is maintained, the lower the damping), by measuring sound levels, waveforms, or damping coefficients. In this study, we measured the damping coefficient of a guitar and a brazilian viola using the logarithmic decrement method. The results showed that the damping, in both instruments, is greater at frequencies below 300 Hz and that the brazilian viola, on average, presents lower damping, which is in agreement with the listeners' perception. The study of vibrations is important in Physics and Engineering courses. We present a motivating application of this study. The work is innovative because it compares the guitar with the brazilian viola.

Keywords: Plucked string instrument, vibrations, damping, logarithmic decrement.

1. Introdução

O violão e a viola caipira são instrumentos muito conhecidos no Brasil e podem facilmente ser usados no ensino de Física e na divulgação científica. Diversos fenômenos físicos têm sido pesquisados, principalmente no violão, como a propagação de ondas em cordas, a ressonância, a formação de ondas estacionárias [1–4]. Uma das propriedades físicas é o amortecimento das vibrações, que pode ser estudado de diversas formas: considerando a percepção dos ouvintes (quanto mais tempo o som se mantém, menor é o amortecimento), fazendo medições de níveis sonoros, formas de onda, espectros sonoros ou coeficientes de amortecimento.

As formas de onda, por exemplo, foram utilizadas no estudo gráfico dos tempos de decaimento de alguns instrumentos de percussão [5], com a utilização do programa gratuito Audacity. Quanto maior o tempo de decaimento, menor é o amortecimento das vibrações.

Neste trabalho medimos o coeficiente de amortecimento de um violão e de uma viola caipira, utilizando o método do decremento logarítmico. O experimento foi dividido em duas fases. Na primeira fase, algumas notas foram executadas por um músico e gravadas em arquivos de áudio, com o programa gratuito Praat. Em seguida os sons obtidos foram trabalhados, com o programa Matlab, no domínio do tempo (forma de onda) e da frequência (espectro), através da transformada rápida de Fourier (FFT). Após a aplicação de um filtro passa banda, limitando o som às frequências em torno da frequência fundamental, nova forma de onda foi obtida e o fator de amortecimento foi calculado, com a utilização

*Endereço de correspondência: marialucia@grillo.com.br
Editor-Chefe: Marcello Ferreira

do método do decremento logarítmico. Os resultados estão de acordo com as percepções sonoras.

O estudo das vibrações é importante em cursos de Física e de Engenharias. Apresentamos então uma aplicação motivadora desse estudo, com o uso de dois instrumentos musicais populares no Brasil. O trabalho é inovador por comparar o violão com a viola caipira. Não conhecemos, na literatura científica, artigos sobre a física da viola caipira, nem comparações com o violão. Para outros cursos, níveis médio ou fundamental, ou mesmo divulgação científica, o tema pode ser tratado sem levar em conta o desenvolvimento matemático, considerando apenas a percepção dos ouvintes ou avaliando graficamente as formas de onda.

2. O Violão e a Viola Caipira

O violão e a viola caipira são instrumentos muito conhecidos no Brasil. Ambos são cordofones dedilhados, com algumas semelhanças e com propriedades particulares, que os tornam fisicamente diferentes (ver Figura 1).

Apenas no Brasil o violão é conhecido com este nome, sendo conhecido em outros países como guitarra (no Brasil a guitarra é um eletrofone com um formato diferente). A viola caipira é conhecida também como viola brasileira, viola de cordas de arame [6] ou ainda pinho, machete ou ligina [7].

A palavra violão, que é o aumentativo de viola, possivelmente foi dada ao instrumento que veio da Espanha, a guitarra espanhola, para distinguir do instrumento semelhante, presente no nosso folclore, a viola, que chamamos viola caipira. O violão é sempre maior que a viola caipira [6].

A origem do violão é bastante obscura [6], podendo ser derivado do alaúde assírio-caldeu e introduzido na Espanha através dos egípcios, persas e árabes ou ainda ter origem greco-romana, derivado de uma cítara romana, que passou a ser chamada vihuela na Espanha.



Figura 1: Violão (esquerda) e Viola Caipira (direita). Fonte: dos autores.

A palavra guitarra vem do grego Kithara, através do latim cithara [7], que são traduzidas como cítara, mas ambas eram usadas para designar qualquer instrumento de cordas dedilhadas. Segundo Rossing [1], em sua origem, possivelmente na Antiguidade, tinha uma forma diferente da atual, com diferentes quantidades de cordas.

Durante o século XVI a vihuela era conhecida na Espanha como instrumento da corte, com um repertório restrito e requintado [7], usada como solista ou como acompanhamento de uma voz cantada (canções e madrigais). Na mesma época a guitarra espanhola, instrumento semelhante, que era tocado com arco, com plectro (palheta) ou era dedilhado, era considerada instrumento popular, usada em festas de ruas ou de adros de igrejas, em danças típicas.

No século XVII [7] a guitarra espanhola passou por alguns aperfeiçoamentos e a vihuela cai em desuso. A forma final do violão atual [6] foi dada no final do século XIX por Antônio Torres Jurado (1817–1892), guitarrista e luthier espanhol.

A viola caipira tem origem em um instrumento trazido por portugueses na época colonial, chamado de viola braguesa (da cidade de Braga) [7], ou viola de arame [8]. É um instrumento típico das zonas rurais. Sua forma é semelhante à do violão, embora menor.

Segundo Grillo e Perez [3] o violão possui 6 cordas (normalmente as 3 mais agudas de nylon e as 3 mais graves de nylon revestidas de aço) e é afinado como mi_3 , si_2 , sol_2 , $ré_2$, $lá_1$ e mi_1 , com frequências 329,6 Hz, 246,9 Hz, 196,0 Hz, 146,8 Hz, 110,0 Hz e 82,4 Hz, respectivamente. A sua música é escrita em clave de sol, uma oitava acima do que soa, ou seja, o violão é um instrumento transpositor de oitava (ver Figura 2).

A viola caipira possui 5 pares de cordas metálicas com afinação variável. A viola utilizada neste trabalho possui afinação mi_3 (dobrada), si_2 (dobrada), $sol\#_3$ e $sol\#_2$, mi_3 e mi_2 , si_2 e si_1 , ou seja, os dois pares mais agudos são de cordas iguais, os outros 3 pares são formados por

ROMANCE DE AMOR - estudo em Mi Menor
autor - Francisco Tarrega
transcrição - Outubrinho D. Moraes

VIOLÃO

Chula
(Variações para viola caipira)

Tema Tradicional
(a partir da versão de Nego de Venança)

Fernando Lewis de Mattos
(Porto Alegre, fev. 2014)

Rítmico

Afinação: Cebolão

Viola

Figura 2: Exemplos de músicas escritas para violão e para viola caipira. Nesta música de viola caipira o autor usa a afinação chamada cebolão, feita 1 tom abaixo, diferente da que usamos.

cordas oitavadas, com frequências 329,6 Hz (dobrada), 246,9 Hz (dobrada), 415,3 Hz, 207,7 Hz, 329,6 Hz, 164,8 Hz, 246,9 Hz e 123,5 Hz, respectivamente. A sua música, como no violão, pode ser escrita em clave de sol, e é também um instrumento transpositor de oitava. A música escrita para viola caipira deve considerar que 3 conjuntos de cordas são oitavadas, e devem então ser escritas duas notas ao mesmo tempo, com intervalo de uma oitava; os outros dois conjuntos são de duas cordas iguais cada, e na música as notas iguais devem ser escritas juntas uma ao lado da outra (ver Figura 2). Há um repertório para viola caipira, porém poucas músicas foram escritas.

Conforme Grillo e Perez [4], o violão possui um dispositivo para afinação que regula a tensão na corda, onde esta é presa e enrolada. O mesmo sistema é usado na viola caipira. Tanto o violão quanto a viola caipira são instrumentos temperados, ou seja, possuem trastes metálicos ao longo do braço do instrumento, que dividem o seu comprimento em tamanhos pré calculados de modo que o comprimento efetivo da corda vibrante sempre produza sons da escala igualmente temperada (que é uma PG de frequências).

Os dedos do músico são colocados nos intervalos entre dois trastes, chamados de casas. Os intervalos musicais sucessivos são de um semitom, cujas razões de frequências são iguais, com valor $r = 1,059463$. As distâncias entre os trastes não são iguais e seguem a expressão:

$$\Delta L = L\{(1/r^n) - (1/r^{n+1})\} \quad (1)$$

onde $n = 0, 1, 2, \dots$ e L é o comprimento da corda.

Essa expressão (equação 1) pode ser obtida considerando:

$$f_{n+1} = r f_n \quad (2)$$

e que a frequência da corda vibrante tem relação com a velocidade e o comprimento da corda conforme a equação 3 [4]:

$$f = nv/2L \quad (3)$$

Henrique [2] compara os espectros obtidos por cordas duplas e por uma corda simples. As cordas duplas geram espectros mais ondulados que os das cordas simples, o que é devido à transferência de energia e às interferências entre os campos sonoros criados pelas duas cordas. Observa também que nas cordas dobradas em oitava, dó₂ e dó₃ (frequências não presentes na viola caipira usada neste trabalho), a energia na região de 500 Hz a 1.000 Hz é reforçada, assim como toda a zona acima dos 2.000 Hz, o que torna o som mais brilhante.

3. Considerações sobre o Amortecimento

Quando se dedilha uma corda, parte da energia inicial exercida é radiada na forma de som, uma fração será

dissipada nos materiais em razão do amortecimento estrutural interno e outra parte por meio do ar, uma vez que as cordas excitadas precisam vencer a viscosidade do fluido (ar). Por este motivo, o amortecimento representa o fenômeno físico no qual a energia mecânica sobre um sistema dinâmico é perdida. Conhecer o comportamento de tal evento é de suma importância para utilização, análise e teste de um sistema vibratório, pois entender como a estrutura dissipa a energia nos permite impor restrições sobre as excitações para obter melhor desempenho e prevenir que o sistema colapse [9].

“Verifica-se que as forças dissipativas são muitas vezes extremamente complexas e por isso difíceis de descrever matematicamente” [2]. Consideramos os três modelos de amortecimentos mais utilizados: histerético (ou interno), estrutural (ou de Coulomb) e viscoso (ou fluido). Estes amortecimentos são responsáveis pela dissipação energética no sistema em forma de calor e som [9]. Podemos definir o coeficiente de amortecimento de um sistema em oscilação livre para caracterizar a amplitude e o tempo das vibrações. Tal coeficiente é classificado em: subamortecido, criticamente amortecido e superamortecido. O fator de amortecimento [10] representa uma das características do material ou sistema, tanto em escala micro, quanto macroscópica, sendo causado [9] pela combinação dos mecanismos físicos, efeitos termoelásticos e correntes de Foucault em materiais ferromagnéticos. No presente trabalho as considerações sobre o amortecimento se devem à sua importância no sistema de cordas dedilhadas, para entendermos como o amortecimento influencia o decaimento das vibrações, fatores fundamentais para produção sonora e para a construção dos instrumentos.

3.1. Amortecimento interno ou histerético

O amortecimento interno está associado a inhomogeneidades existentes na estrutura do material, como falhas estruturais, impurezas internas e efeitos termoelásticos causados por gradientes locais de temperatura [10].

Os materiais que dissipam energia de forma cíclica estão sujeitos ao fenômeno da curva de tensão-deformação, que graficamente forma o chamado laço de histerese (Figura 3), onde a área do laço representa a capacidade de dissipação energética, ou seja, a capacidade de amortecimento do material por ciclo e por unidade de volume, conforme equação 4.

$$I = \oint \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

- I : Capacidade de amortecimento do material (N m)
- σ : Tensão exercida no material (N)
- ε : Deformação sofrida pelo material em resposta à tensão (m)

A integral cíclica da tensão com o respectivo deslocamento corresponde ao trabalho feito pelo amortecimento. Dessa maneira esta integral representa a energia

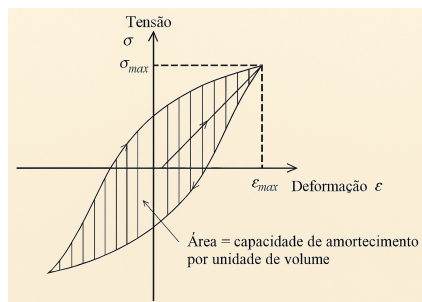


Figura 3: Laço de histerese [10].

dissipada por ciclo de movimento [10]. Este modelo é muito utilizado no estudo de vibrações envolvendo deformações em sólidos submetidos a excitações harmônicas [2].

3.2. Amortecimento estrutural ou de Coulomb

Um sistema mecânico pode possuir diferentes materiais e desta diversidade considera-se o amortecimento estrutural. As junções entre os distintos materiais que compõem o sistema sofrem fricção e impacto gerando dispersão energética quando o sistema é excitado, ou seja, este amortecimento não é inerente a um material, mas é causado pelo atrito entre materiais heterogêneos que compõem o sistema, tal qual instrumentos de cordas dedilhadas que são construídos com a junção de materiais diferentes. Logo, a dissipação energética é variável para cada sistema, não havendo uma maneira analítica generalizada para calcular o amortecimento estrutural.

Para a acústica é de extrema importância entender como ocorre a transferência de energia entre os materiais, pois tem-se como base a transferência de energia mecânica em som para o funcionamento ideal de um instrumento musical, assim obtendo melhor radiação sonora. Tal transferência de energia é tratada por meio do conceito de impedância acústica.

A impedância acústica [2] se traduz como o grau de resistência que o meio oferece à passagem da energia oscilatória. Tal resistência é agravada nas junções dos diferentes materiais, pois valores discrepantes de impedância entre dois materiais em contato geram reflexões de ondas no sistema, reduzindo a transferência de energia entre os materiais e prejudicando a radiação sonora do instrumento.

Apesar da resistência que o meio oferece às vibrações, o fenômeno da impedância é de extrema importância para o funcionamento adequado de um instrumento musical. Para uma boa produção acústica é necessária a ocorrência deste fenômeno, pois através da reflexão das ondas as vibrações ressoam na estrutura do sistema fazendo com que o som permaneça por mais tempo. A impedância é necessária para o funcionamento do instrumento, mas havendo um limite que não prejudique a passagem das vibrações entre os meios que compõem o sistema.

Este modelo é muito menos utilizado por ser extremamente não linear, o que conduz a muitas dificuldades analíticas e numéricas [2].

3.3. Amortecimento viscoso ou fluídico

A força viscosa de amortecimento (em N) é proporcional à velocidade e representa oposição ao movimento [11]. Com isso podemos definir tal força como:

$$F = -c\dot{x} \quad (5)$$

- c : coeficiente dissipativo viscoso (N s m^{-1})
- $\dot{x}$: velocidade do corpo em deslocamento (m/s)

Para deduzir o amortecimento viscoso será considerado um sistema massa mola amortecido em oscilação livre com um grau de liberdade (Figura 4), mas que pode ser comparado a uma oscilação elástica sobre um fluido, no qual sua equação de movimento é dada pela equação 6.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t, x) \quad (6)$$

- m : massa do corpo deslocado (kg)
- $\ddot{x}$: aceleração do corpo (m/s^2)
- c : coeficiente de viscosidade, ou dissipativo viscoso (N s m^{-1})
- $\dot{x}$: velocidade do corpo em deslocamento (m/s)
- k : constante elástica de restauração à posição de equilíbrio (N/m)
- x : deslocamento da posição de repouso (m)

Considerando $f(t) = 0$ e definindo os novos parâmetros w_0 e ζ , podemos reescrever a equação (6) da forma [10]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (7)$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

- w_0 : frequência natural de vibração.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2w_0m} \quad (9)$$

- ζ : Coeficiente de amortecimento.

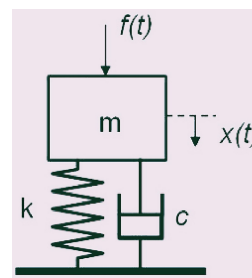


Figura 4: Sistema massa mola amortecido [11].

Com os novos parâmetros a equação pode ser reescrita na forma:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (10)$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (11)$$

A equação (11) é uma equação diferencial linear de segunda ordem com coeficientes constantes; para resolvê-la buscamos uma solução complexa da forma:

$$z = e^{\gamma t} \quad (12)$$

de maneira que, a partir das derivadas da equação (12), podemos escrever a equação característica e determinar as raízes.

$$\gamma^2 + \zeta\gamma + \omega_0^2 = 0 \quad (13)$$

$$\gamma = \omega_0 \left(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1} \right) \quad (14)$$

Pela equação (14) pode-se perceber que o comportamento da oscilação descrita depende do parâmetro de amortecimento ζ exercido sobre o movimento, o que direciona para três possibilidades da solução de γ , ou seja, três diferentes tipos de amortecimento:

- $\zeta > 1$: possui duas soluções reais, este caso é chamado de superamortecido.
- $\zeta = 1$: possui uma solução real, este caso é chamado criticamente amortecido.
- $1 > \zeta \geq 0$: possui duas soluções complexas, este caso é chamado de subamortecido.

Entretanto, os sistemas superamortecido e criticamente amortecido não condizem com o amortecimento produzido pelo violão e viola caipira, enquanto sistemas estudados neste trabalho, uma vez que são sistemas que não oscilam. Portanto, apenas o caso subamortecido será considerado nas análises posteriores, em que a oscilação gerada perdura por um determinado tempo. Quanto maior o amortecimento, menor será o tempo de permanência da oscilação.

Para encontrar uma solução no caso subamortecido temos a raiz de um número negativo, então pode-se reescrever γ na forma:

$$\gamma = \omega_0(-\zeta \pm i\omega_d) \quad (15)$$

com ω_d sendo a frequência natural amortecida tendo o seguinte valor:

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (16)$$

Tomando a parte positiva de γ , temos que:

$$\gamma = \omega_0(-\zeta + i\omega_d) \quad (17)$$

Aplicando o resultado da equação (17) na (12), temos que:

$$z = P e^{\omega_0(-\zeta + i\omega_d)t} \quad (18)$$

$$P = A e^{i\varphi} \quad (19)$$

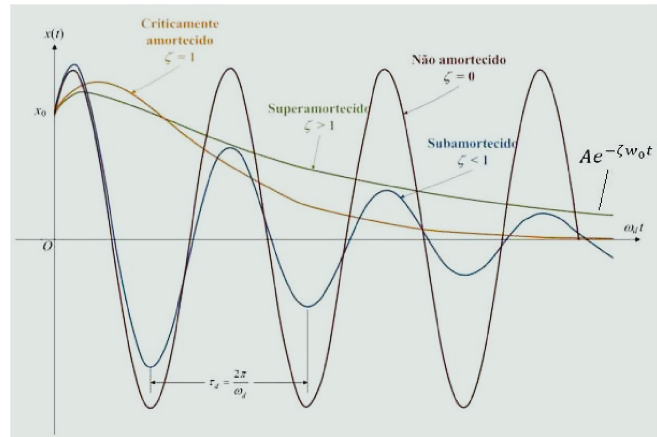


Figura 5: Fator de amortecimento [10]. Adaptada.

- P : uma constante complexa arbitrária.
- A e φ : constantes reais arbitrárias.

Por fim, tomando a parte real da equação (18) com o parâmetro P substituído, tem-se a solução para o sistema subamortecido com equação da forma [10]:

$$x(t) = A e^{-\zeta\omega_0 t} \cos(\omega_d t + \varphi) \quad (20)$$

Na Figura 5 pode ser visto o decaimento energético gerado pelos três possíveis amortecimentos, mas para o caso do sistema subamortecido foi encontrada solução para o sistema, na equação 20, onde o fator $A e^{-\zeta\omega_0 t}$ representa as amplitudes de oscilação que decaem com o tempo.

4. Método do Decremento Logarítmico

Existem diferentes métodos para determinar o nível de amortecimento sobre o qual um sistema está submetido. A escolha do método depende principalmente da faixa do parâmetro de amortecimento, o ζ mostrado no item 3.3, da frequência de vibração e se o método em questão é adequado para o sistema a ser analisado [12].

O método do decremento logarítmico calcula o amortecimento de um sistema ou material a partir das ondas sonoras geradas em consequência de uma excitação livre. A utilização deste método se torna de extrema conveniência na situação em que é possível medir as amplitudes de oscilações geradas acusticamente pela vibração do sistema.

Será considerada a fase inicial nula e fazendo a aproximação para pequenas oscilações a equação 21 se reduz a:

$$x(t) = A e^{-\zeta\omega_0 t} \quad (21)$$

Se considerarmos dois picos quaisquer (ver Figura 6) pode-se reescrever a equação 21, referente a cada amplitude, da seguinte forma:

$$x_1(t) = A e^{-\zeta\omega_0 t_1} \quad (22)$$

$$x_n(t) = A e^{-\zeta\omega_0 t_n} \quad (23)$$

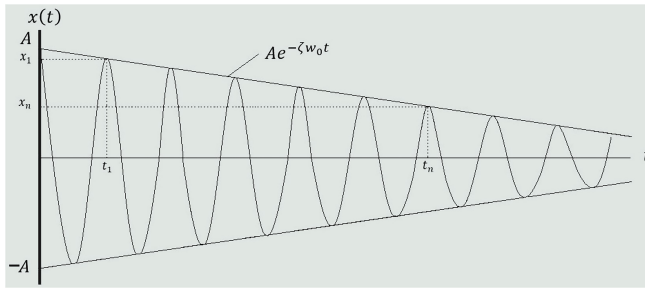


Figura 6: Decaimento das vibrações [10].

As equações 22 e 23 representam os valores de amplitude medidas e, dividindo as equações citadas, é dado que:

$$\frac{x_1}{x_n} = \frac{Ae^{-\zeta w_0 t_1}}{Ae^{-\zeta w_0 t_n}} = e^{\zeta w_0 (t_n - t_1)} \quad (24)$$

aplicando o logaritmo natural, define-se o decremento logarítmico δ da seguinte forma:

$$\delta = \ln \left(\frac{x_1}{x_n} \right) = \zeta w_0 (t_n - t_1) \quad (25)$$

que deve ser generalizada na forma:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_n} \right) = \zeta w_0 (\Delta t) \quad (26)$$

de forma que:

- n : número de vales entre as duas amplitudes escolhidas.
- Δt : período de amortecimento.

O período de amortecimento Δt é definido como:

$$\Delta t = T_d = \frac{2\pi}{w_d} = \frac{t_n - t_1}{n} \quad (27)$$

substituindo a equação (27) na (26) e considerando o fator $w_d = w_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$, obtém-se:

$$\delta = \zeta \frac{2\pi}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (28)$$

finalmente, isolando ζ na equação 28 tem-se o fator de amortecimento do sistema.

$$\zeta = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (29)$$

Deve ser frisado que para os cálculos de demonstração sobre o decremento logarítmico foi utilizado o modelo de amortecimento viscoso visto no item 3.3, mas não foram desconsiderados os amortecimentos estrutural e interno, pois um sistema não pode ser desvinculado das diversas formas de amortecimento que o influenciam. Ou seja, o decaimento das oscilações de um sistema pelo modelo de amortecimento viscoso (ver Figura 4) sofre influência dos outros tipos de amortecimentos, visto que são inerentes ao sistema e sempre influenciarão as oscilações. Desta forma, o fator de amortecimento ζ , mostrado na equação 29, engloba todas as possibilidades de dispersão energética agindo sobre o sistema.

5. Experimento

Seguindo o trabalho de Teixeira [13], este experimento tem como objetivo medir o coeficiente de amortecimento do violão e da viola caipira, utilizando o método do decremento logarítmico. Para isto o experimento foi dividido em duas fases: durante a primeira fase realizamos a execução das notas do violão e da viola caipira, onde os sons foram gravados em arquivos de áudio, utilizando o microfone de um notebook Asus, com cancelamento ativo de ruídos, por meio do programa gratuito *Praat*, e foram lidos e trabalhados no programa *Matlab*. no domínio do tempo (forma de onda) e foram convertidos para o domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier (FFT), dessa forma foram obtidos os espectros sonoros. Esta conversão é necessária para que possamos realizar a análise das frequências excitadas e, assim, descobrir a frequência fundamental e os harmônicos superiores da nota musical em questão. O violão utilizado neste trabalho foi confeccionado pelo luthier Jó Nunes, modelo Luiza 2011 e a viola caipira é da marca Rozini, modelo Caipira 2015. Os arquivos de som da viola foram obtidos com a vibração de duas cordas de cada vez, isto é, das cordas duplas, da forma como a viola é executada normalmente.

Durante o experimento, o instrumento foi apoiado em uma das pernas do músico mantendo distância de seu tronco, no intuito de minimizar o contato entre eles, pois tal contato resultaria em um amortecimento que não é inerente ao objeto de estudo prejudicando as vibrações do instrumento. O músico então posicionou-se a aproximadamente 50 cm do microfone de gravação para executar as notas musicais, mantendo uma força constante e transversal às cordas, permitindo que as notas soassem até a extinção. A distância foi medida com uma trena, com precisão de milímetro. Além disso, é necessário considerar o ambiente da experimentação. As gravações foram realizadas sempre na mesma sala (para que a reverberação do ambiente não interferisse), que é retangular, de alvenaria com janelas, estante de livros e armário, sendo que a superfície refletora mais próxima ao instrumento musical era o chão, dessa forma as reflexões foram minimizadas, a fim de priorizar o som direto, não os refletidos.

Uma vez obtidos os espectros, realizamos a aplicação do filtro passa banda. O uso deste filtro no sinal de áudio delimita uma faixa de frequência em torno da frequência fundamental e impede a passagem de todas as outras frequências presentes, ou seja, permitimos a passagem de uma frequência e impedimos a passagem dos harmônicos superiores e ruídos que surgiram durante a gravação. Por último, retornamos o sinal ao domínio do tempo através da transformada inversa de Fourier (IFFT), a fim de calcular o amortecimento dos instrumentos.

A produção de uma nota musical emite, além da frequência fundamental, os harmônicos superiores. Juntamente a isto, os instrumentos musicais estão sujeitos ao fenômeno da ressonância acústica e efeitos

não lineares. A combinação destes três acontecimentos gera irregularidades na onda, o que nos impede de utilizar o método sem o tratamento adequado ao som, com o uso do filtro passa banda para que se obtenha a forma de onda apenas da frequência fundamental e assim, obter um gráfico condizente com a utilização do método.

6. Cálculo do Amortecimento

Uma vez realizado o experimento, o fator de amortecimento foi calculado, conforme equação 29. Foi utilizado o decremento logarítmico (equação 26), que é obtido através da razão entre os valores de duas amplitudes. A Figura 7 ilustra a forma de onda do violão após o tratamento do áudio, onde foram escolhidos o primeiro e o vigésimo picos de amplitude, com seus valores sinalizados na figura, utilizando como exemplo a nota sol#₁ cuja frequência é 103,8 Hz. Desta forma, seguem os cálculos.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_n} \right) = 0,007199815$$

- $n = 20$
- $\frac{x_1}{x_n} = \frac{0,0172658}{0,0149503}$

Então o coeficiente de amortecimento será:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} = 0,001145885$$

O procedimento experimental e os cálculos apresentados anteriormente foram repetidos para todas as notas dos instrumentos musicais, de maneira a se obter a Tabela 1 e traçar os gráficos da Figura 8.

Observando os gráficos da Figura 8, é notável que em ambos os instrumentos as frequências mais baixas sofrem maior amortecimento, sendo assim, segue a Tabela 2 com a média dos amortecimentos, divididos em faixas

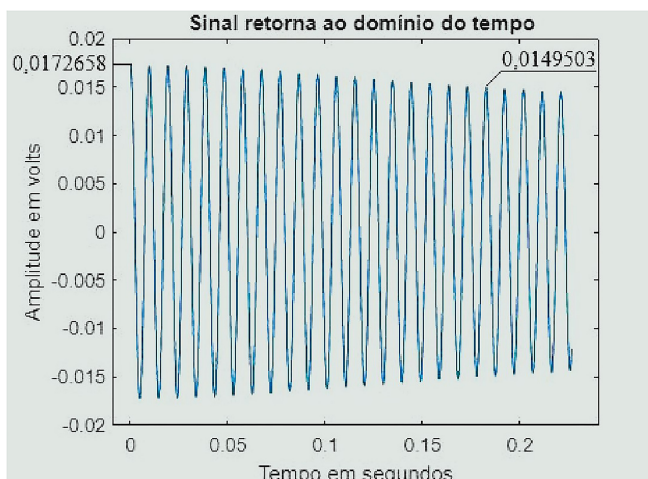


Figura 7: Forma de onda do sinal filtrado do violão, com a nota sol#₁. Fonte: dos autores.

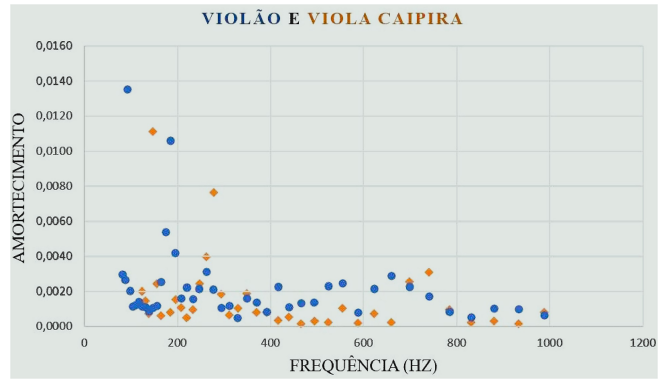


Figura 8: Relação amortecimento x frequência do violão (bolinhas azuis) e da viola (quadrados marrons). Fonte: dos autores.

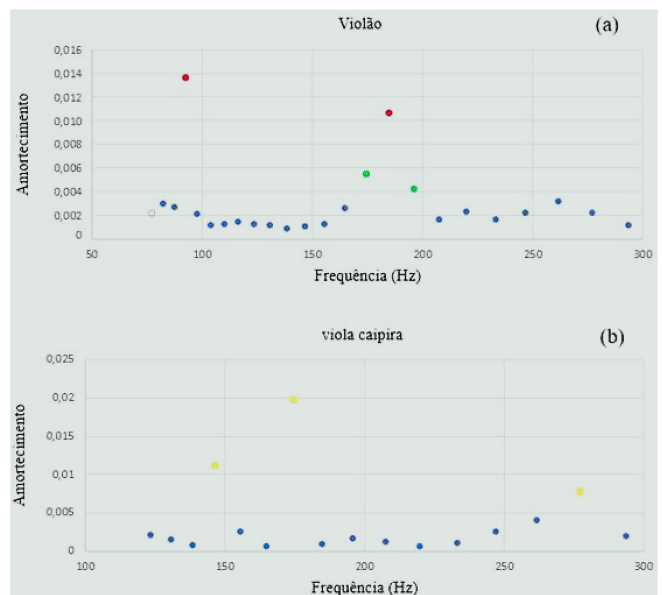


Figura 9: Relação amortecimento x frequência abaixo de 300 Hz. Fonte: dos autores.

de frequência, e as Figuras 9 e 10, que dividem as faixas de frequência a serem analisadas.

Neste contexto, podemos perceber que para frequências abaixo de 300 Hz os instrumentos exibem altos valores de amortecimento, em algumas frequências. No violão (Figura 9a) identificamos as notas musicais fá₂ e sol₂, que estão indicadas em verde, com desvio moderado e as notas fá#₁ e fá#₂, que estão indicadas em vermelho, com elevado desvio no fator de amortecimento quando comparadas às outras notas musicais, visto que todas as outras frequências possuem fator de amortecimento abaixo de 0,004. Já na viola caipira (Figura 9b) identificamos as notas ré₂, fá₂ e dó#₃, que estão indicadas em amarelo, com elevado desvio no fator de amortecimento, de modo que a nota dó#₃, que possui o menor desvio, ainda tem seu fator de amortecimento (0,0076) maior que o dobro da média (0,0036).

Tabela 1: Fatores de amortecimento do violão e da viola caipira. Fonte: dos autores.

Nota	Violão				Viola caipira		
	Frequência (Hz)	Pico 1	Pico 20	amortecimento ζ	Pico 1	Pico 20	amortecimento ζ
Mi1	82,4	0,012806500	0,008840970	0,002948780	–	–	–
Fa1	87,3	0,007842230	0,005631830	0,002634712	–	–	–
Fa#1	92,5	0,004233030	0,000772339	0,013536875	–	–	–
Sol1	98,0	0,006927880	0,005375050	0,002019560	–	–	–
Sol#1	103,8	0,017265800	0,014950300	0,001145885	–	–	–
La1	110,0	0,010465800	0,008990230	0,001209373	–	–	–
la#1	116,5	0,006355020	0,005310310	0,001429169	–	–	–
Si1	123,5	0,012708700	0,010982600	0,001161628	0,001430840	0,001111760	0,002007874
Do2	130,8	0,011727100	0,010198500	0,001111392	0,004685000	0,003898700	0,001462018
Do#2	138,6	0,006344070	0,005693140	0,000861494	0,013036500	0,011851800	0,000758161
Re2	146,8	0,021935400	0,019204600	0,001057997	0,028716400	0,007088470	0,011132189
Re#2	155,6	0,035961200	0,030918500	0,001202302	0,069450100	0,051119200	0,002438631
Mi2	164,8	0,017594700	0,012816300	0,002521642	0,021875000	0,020271000	0,000606007
Fa2	174,6	0,015683000	0,007969000	0,005387462	0,011578100	0,000976933	0,019671345
Fa#2	185,0	0,034677000	0,009148210	0,010603248	0,010590800	0,009553950	0,000819895
Sol2	196,0	0,125062000	0,073843400	0,004192606	0,015467000	0,012736600	0,001545623
Sol#2	207,7	0,105519000	0,086149800	0,001613856	0,014409100	0,012590800	0,001073448
La2	220,0	0,082089700	0,062166900	0,002212168	0,053860200	0,050615200	0,000494493
La#2	233,1	0,055244100	0,045287300	0,001581480	0,102165000	0,090606000	0,000955476
Si2	246,9	0,005544620	0,004224060	0,002164752	0,012266400	0,009015190	0,002450604
Do3	261,6	0,010181300	0,006874680	0,003125053	0,123970000	0,075144400	0,003983839
Do#3	277,2	0,015844000	0,012126600	0,002127813	0,207249000	0,079300000	0,007644648
Re3	293,7	0,039146300	0,034150300	0,001086507	0,070844200	0,056087000	0,001858760
Re#3	311,2	0,024808000	0,021404600	0,001174247	0,043597400	0,040051800	0,000675007
Mi3	329,6	0,025690400	0,024141700	0,000494787	0,056089600	0,049198100	0,001043224
Fa3	349,2	0,013494600	0,011003500	0,001623985	0,066855600	0,052575900	0,001912062
Fa#3	370,0	0,021748600	0,018301900	0,001373064	0,004795690	0,004319780	0,000831689
Sol3	392,0	0,043275400	0,038977100	0,000832460	0,041323000	0,037310000	0,000812946
Sol#3	415,5	0,033611700	0,025337200	0,002248858	0,031967200	0,030620800	0,000342429
La3	440,0	0,007940040	0,006915320	0,001099593	0,033045000	0,030817200	0,000555429
La#3	466,2	0,008564110	0,007222200	0,001356163	0,039901700	0,039108300	0,000159825
Si3	493,9	0,029829000	0,025028100	0,001396439	0,025715700	0,024660900	0,000333292
Do4	523,3	0,086353500	0,064704000	0,002296809	0,028805200	0,027891400	0,000256538
Do#4	554,4	0,058348700	0,042833900	0,002459790	0,051640600	0,045340900	0,001035292
Re4	587,3	0,020127600	0,018216000	0,000794117	0,056704200	0,055172200	0,000217955
Re#4	622,3	0,020370200	0,015549800	0,002148788	0,054149200	0,049383200	0,000733170
Mi4	659,3	0,038662000	0,026940000	0,002874685	0,084677800	0,082061400	0,000249760
Fa4	698,5	0,020142400	0,015131700	0,002276190	0,081935400	0,059450700	0,002552708
Fa#4	740,0	0,024089500	0,019395000	0,001724925	0,067607000	0,045759500	0,003105990
Sol4	784,0	0,017414500	0,015635100	0,000857724	0,084171000	0,074494100	0,000971883
Sol#4	830,6	0,030464000	0,028499800	0,000530373	0,037247600	0,036094000	0,000250358
La4	880,0	0,028871700	0,025361400	0,001031590	0,039229700	0,037707900	0,000314844
La#4	932,3	0,023050400	0,020390400	0,000975770	0,023147500	0,022633800	0,000178591
Si4	987,8	0,023803300	0,021967800	0,000638581	0,097234800	0,087843400	0,000808292

Tratando a faixa de frequência acima de 300 Hz, os instrumentos possuem baixos valores de amortecimento quando comparados ao quadro geral, conforme Figura 10.

No violão (Figura 10a) embora tenhamos uma boa distribuição dos valores de amortecimento sem a ocorrência de pontos destoantes, ocorrem pequenos saltos nos valores de amortecimento das notas sol#3, ré4 e ré#4,

Tabela 2: Média dos amortecimentos, divididos em faixas de frequência.

Faixa de frequência (Hz)	Média de amortecimento ζ	
	Violão	Viola caipira
82,4 – 987,8	0,002207834	0,002060657
82,4 – 293,7	0,002910250	0,003681438
311,2 – 987,8	0,001438521	0,000825775

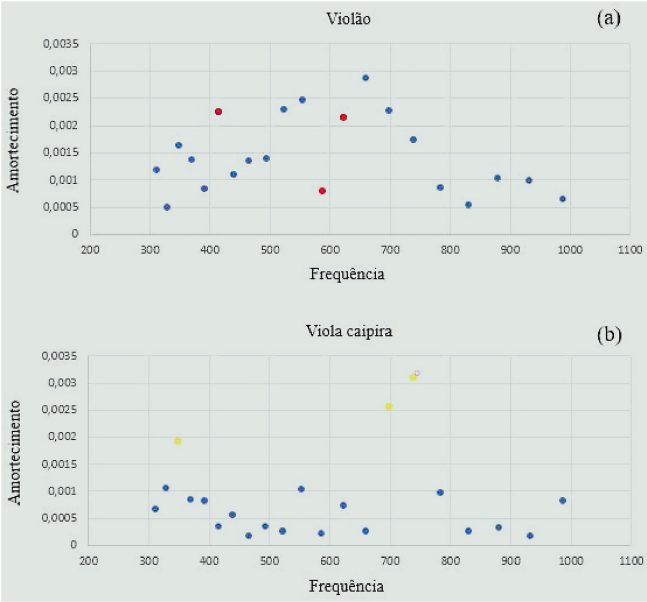


Figura 10: Relação amortecimento x frequência acima de 300 Hz.

indicadas em vermelho. Na viola caipira (Figura 10b) os valores de amortecimento encontram-se bem agrupados, com exceção das notas fá₃, fá₄ e fá#₄, indicadas em amarelo, que possuem altos fatores de amortecimento quando comparados a esta faixa de frequência.

Com a análise e comparação da relação amortecimento por frequência (Figura 8), mostrou-se que a viola caipira possui seu fator de amortecimento menor que o violão. Tal diferença ocorre devido às distinções na estrutura dos sistemas em questão, como material, dimensões, número de cordas, tipo de madeira, material das cordas e dimensões de cada instrumento, características que definem como as oscilações se processam na estrutura e a capacidade de deslocamento de ar da caixa acústica. Essas diferentes características físicas além de interferirem no amortecimento geram particularidades que alteram além do tempo de persistência sonora, também a intensidade do som e a forma de onda produzida, características que influenciam no timbre dos instrumentos musicais. Na Figura 11 vemos os espectros da viola e do violão, que evidenciam a diferença de timbres e de níveis de intensidade sonora.

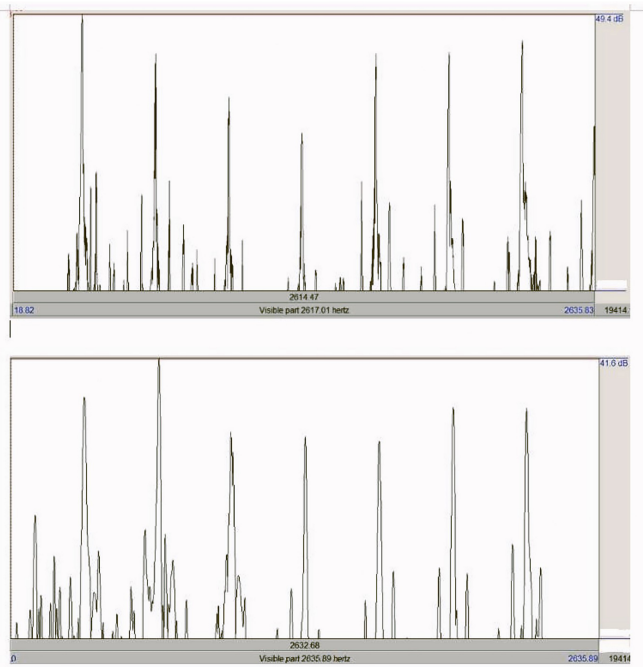


Figura 11: Espectros da nota mi₃ no violão (abaixo) e na viola caipira (acima).

7. Conclusão

Neste trabalho foram apresentadas informações que nos permitem a qualificação de sistemas vibratórios, neste caso dois instrumentos musicais de cordas dedilhadas. Esta fundamentação foi iniciada com o estudo sobre os amortecimentos que agem numa estrutura vibrante. O conhecimento sobre tal característica do sistema influencia diferentes áreas científicas, pois define o decaimento energético e as amplitudes de vibração em uma estrutura qualquer. Assim, este saber pode ser aplicado em áreas, como engenharia estrutural, mecânica dos fluidos, estudo dos materiais absorvedores e acústica.

Foi realizado um experimento com o intuito de medir o coeficiente de amortecimento, demonstrar as diferenças acústicas e qualificar os instrumentos escolhidos. Em comparação aos instrumentos foi observado que o violão possui amortecimento maior que a viola caipira, considerando a faixa de frequência de 82,4 Hz a 987,8 Hz, entretanto em ambos há a ocorrência de pontos extremos no fator de amortecimento na faixa de frequências abaixo de 300 Hz. No violão as notas identificadas foram fá₂, sol₂, fá#₁ e fá#₂ e na viola caipira tais notas com desvio foram ré₂, fá₂ e dó#₃. Já para as frequências acima de 300 Hz, no violão ocorreu uma boa distribuição dos valores de amortecimento, mas com pequenos saltos nas notas dó#₄, ré₄ e ré#₄; na viola caipira os valores de amortecimento encontram-se mais agrupados, mas

com pontos extremos no valor de amortecimento para as notas fá₃, fá₄ e fá#₄. Em média o amortecimento da viola caipira é menor que do violão.

Este estudo é uma importante ferramenta para compreensão de como alterações na estrutura alteram as vibrações e a dissipação energética num sistema de maneira quantitativa, embora não defina os instrumentos qualitativamente, uma vez que o valor apreciativo é subjetivo, podendo depender da intenção do instrumentista ou da perspectiva do ouvinte.

Como o tema das vibrações é estudado em cursos de Física e Engenharias, este estudo pode ser utilizado como motivação neste tema. Uma boa introdução ao tema está em Santos, Molina e Tufaile [14]. O estudo é também inovador, por comparar dois instrumentos que são parecidos, mas que apresentam muitas diferenças, e que não encontramos trabalhos anteriores com esta comparação. O desenvolvimento matemático exige conhecimentos específicos, abordados normalmente na graduação desses cursos. Em outros cursos, de nível médio, ou mesmo em atividades de divulgação científica, as vibrações e o amortecimento podem ser considerados de forma qualitativa, através da percepção sonora, também com o uso da análise gráfica do decaimento das ondas sonoras ou com medidas de níveis de intensidade sonora.

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi publicado no próprio artigo.

Referências

- [1] T.D. Rossing, *The Science of Sound* (Addison-Wesley, New York, 1990), 2 ed.
- [2] L.L. Henrique, *Acústica Musical* (Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2007), 2 ed.
- [3] M.L. Grillo e L.R. Perez (org.), *A Física na Música* (Eduerj, Rio de Janeiro, 2013).
- [4] M.L. Grillo e L.R. Perez (org.), *Física e Música* (Livraria da Física, São Paulo, 2016).
- [5] M.L.N. Grillo e L.R.P.L. Baptista, em: *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics* (Buenos Aires, 2016).
- [6] J. Vasconcelos, *Acústica Musical e Organologia* (Movimento, Porto Alegre, 2002).
- [7] J.A.S. Ribeiro, *Sobre os Instrumentos Sinfônicos – e em torno deles* (Record, Rio de Janeiro, 2005).
- [8] S. Sadie (ed.), *Dicionário Grove de Música* (Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 1994).
- [9] B.C. Musolino, *Algoritmo de determinação do coeficiente de amortecimento em materiais refratários de alta alumina*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo (2011).
- [10] L.C. Cossolino e A.H.A. Pereira, *Amortecimento: classificação e métodos de determinação* (ATCP Engenharia Física, São Carlos, 2010).
- [11] D. Masotti, *Comparação de métodos de determinação do amortecimento estrutural através de técnicas de ajuste de curvas de funções resposta em frequência*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (2013).
- [12] P.S. Teixeira, A.J. Silva e J.F.S. Feiteira, *Cadernos UniFOA* **9**, 17 (2014).
- [13] P.S. Teixeira, *Análise e síntese de sinais de instrumentos dedilhados. Em estudo: O Violão*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda (2015).
- [14] E.M. Santos, C. Molina e A.P.B. Tufaile, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **35**, 2507 (2013).