

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
SÃO PAULO



Leandro Sousa Sevilha

Kalimba: construção, comparação teórica e possíveis aplicações em salas de aulas

Caraguatatuba

2022

LEANDRO SOUSA SEVILHA

Kalimba: construção, comparação teórica e possíveis aplicações em salas de aulas

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus de
Caraguatatuba para obtenção do título de graduado
em Licenciatura em Física. Orientador: Prof. Me.
Jurandi Leão Santos

Caraguatatuba

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Serviço de Biblioteca e Documentação do IFSP Câmpus Caraguatatuba

S511k Sevilha, Leandro Sousa
Kalimba: construção, comparação teórica e possíveis aplicações em salas de aula. / Leandro Sousa Sevilha. -- Caraguatatuba, 2022.
26 f. : il.

Orientador: Prof. Me. Jurandi Leão Santos.
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) -- Instituto Federal de São Paulo, Caraguatatuba, 2022.

1. Física. 2. Ondulatória. 3. Acústica. 4. Experimento de baixo custo. 5. Piano de polegão. I. Santos, Jurandi Leão, orient. II. Instituto Federal de São Paulo. III. Título.

CDD: 530



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CÂMPUS CARAGUATATUBA
FUC COORD CURSO SUP LICENC MATEMATICA**

OFÍCIO N.º 89/2022 - CMAT-CAR/DAE-CAR/DRG/CAR/IFSP

Nome: SEVILHA, Leandro Sousa

Título: Kalimba: construção, comparação teórica e possíveis aplicações em salas de aula

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo, câmpu Caraguatatuba para a obtenção do título de graduado em Licenciatura em Física.

Aprovado em: 11, Fevereiro de 2022

Banca Examinadora

Prof(a). Jurandi Leão Santos

Instituto Federal de São Paulo - Câmpus Caraguatatuba

Julgamento: Aprovado

Prof(a). José Roberto Severino Martins Jr

Instituto Federal de São Paulo - Câmpus Caraguatatuba

Julgamento: Aprovado

Prof(a). Luis Fernando Viviani Thomazini

Instituto Federal de São Paulo – Câmpus Caraguatatuba

Julgamento: Aprovado

Documento assinado eletronicamente por:

- **Jurandi Leao Santos**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/02/2022 10:29:04.
- **Jose Roberto Severino Martins Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/02/2022 10:30:35.
- **Luis Fernando Viviani Thomazini**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/02/2022 10:45:16.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/02/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifsp.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 299091

Código de Autenticação: e0a5df5bd0



OFÍCIO N.º 89/2022 - CMAT-CAR/DAE-CAR/DRG/CAR/IFSP

AVENIDA BAHIA, 1739, INDAIÁ, CARAGUATATUBA / SP, CEP 11665-071

Dedico à minha família que tanto me apoiou nessa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa, minha filha e meus pais que sempre estiveram ao meu lado me ajudando nas dificuldades dessa jornada.

Agradeço aos inúmeros professores que me inspiraram, seja na faculdade ou até mesmo antes, em especial ao professor Luis Fernando, que deu o ponta pé inicial desse projeto nas aulas de laboratório.

Agradeço a meu orientador, Jurandi Leão, pela paciência demonstrada ao longo deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho compara as frequências fundamentais de três kalimbas, construídas a partir de materiais de baixo custo, com os valores esperados segundo a equação de Euler-Bernoulli, aplicada para uma lâmina presa-apoiada-livre. Além dos resultados corresponderem aos valores teóricos, o processo de construção e afinação revelaram possibilidades para trabalhar conceitos de propagação sonora, relação entre comprimento e frequência, ressonância, batimento e timbre, em aulas de Física e conceitos musicais e estéticos, relativos a cultura africana e afrodescendente, em aulas de Artes.

Palavras-chave: Ondulatória. Acústica. Experimento de Baixo Custo. Piano de Polegar.

ABSTRACT

This work compares the fundamental frequencies of three kalimbas, built from low-cost materials, with the expected values according to the Euler-Bernoulli equation, applied to a free-supported-clamped beam. In addition to the results corresponding to theoretical values, the construction and tuning process revealed possibilities to work on concepts of sound propagation, relation between length and frequency, resonance, beat and timbre in Physics classes and musical and aesthetic concepts, relating to african and afro-descendant culture, in Arts classes.

Keywords: Undulatory. Acoustics. Low Cost Experiment. Thumb Piano.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1 Introdução | 10 |
| 2 Kalimba | 11 |
| 2.1 A Física da kalimba..... | 12 |
| 3 Metodologia | 14 |
| 3.1 Construção | 15 |
| 3.2 Ajuste | 16 |
| 3.3 Possíveis aplicações | 19 |
| 4 Resultados e discussão | 21 |
| 5 Conclusão e perspectivas..... | 24 |
| Referências | 24 |

1 Introdução

A kalimba é um instrumento de percussão de origem africana, que consiste em um conjunto de teclas de metal, ou madeira, presas por uma extremidade à uma estrutura ressonante. As teclas são tocadas com os polegares e cada uma delas tem um comprimento diferente, de modo a produzir uma nota musical específica. Segundo Souza (2011), as vibrações são transmitidas para o corpo do instrumento, onde são amplificadas pelo efeito de ressonância. Esse instrumento pode ser construído sem muitos recursos, constituindo então, uma ferramenta com potencial para o ensino de conceitos básicos de ondulatória, uma vez que permite ilustrar tópicos como frequência, ressonância, batimento e timbre. Além disso, pode ser utilizado, de forma interdisciplinar, nas aulas Artes (sobre a arte e a música africana, por exemplo).

Este trabalho apresenta a construção de três kalimbas a partir de materiais de baixo custo, a comparação dos resultados com a literatura, e o estudo das possíveis aplicações em aulas de ondulatória. Ferrari *et al.* (2016) sugere a construção de uma kalimba com materiais de baixo custo, buscando uma integração entre as aulas de artes e a cultura afrodescendente.

Conforme Lérias (2016), as relações entre física e música são evidentes; deixar de explorá-las em atividades práticas e experimentais é perder a possibilidade de aproveitar o interesse natural das pessoas pela música e de integrar diferentes inteligências, como a musical, a linguística, a lógico-matemática e a cenestésico-corporal:

[...] a música é um tipo de arte com imenso potencial educativo já que, apesar de manifestações estéticas por excelência, explicitamente ela se vincula a conhecimentos científicos ligados à física e à matemática além de exigir habilidade motora e destreza que a colocam, sem dúvida, como um dos recursos mais eficazes na direção de uma educação voltada para o objetivo de se atingir o desenvolvimento integral do ser humano (SAVIANI, 2003 *apud* LERIAS, 2016, p. 19).

Ainda neste sentido, atividades experimentais são relevantes para um aprendizado contextualizado das ciências naturais (GONÇALVES *et al.*, 2017), já que têm o potencial de despertar a curiosidade e o interesse dos alunos, possibilitando um processo de ensino-aprendizagem mais ativo e significativo, especialmente quando pensadas para que os discentes possam manipular objetos simples livremente (SANTOS *et al.*, 2004). Apesar disso, aulas expositivas continuam predominantes no ensino de física (Darroz *et al.*, 2015). Mesmo no Estado de São Paulo, onde a maioria das escolas possui espaços destinados a laboratórios de ciências, esses espaços são destinados para outras finalidades e as aulas experimentais continuam raras (SANTOS *et al.*, 2004). Essa situação reforça práticas tradicionais de ensino, descontextualizadas, pouco estimulantes e excessivamente direcionadas para a resolução de exercícios e aplicação de fórmulas (MOREIRA, 2018).

Essa situação é agravada pelo déficit de professores de física, o que provoca aulas ministradas por profissionais sem formação específica e, sendo assim, sem a qualificação necessária para uma prática docente diversificada (PINTO, 2014). Nesse contexto, justifica-se o desenvolvimento de materiais de apoio às aulas experimentais como forma de auxiliar no processo ensino-aprendizagem.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo investigar o funcionamento da kalimba e estudar as possíveis aplicações para o ensino de ondulatória envolvidas em sua construção e afinação. Sua importância situa-se em mostrar que não é necessário o uso de laboratórios e equipamentos específicos para a realização de aulas experimentais, as quais podem ser feitas a partir de materiais de baixo custo.

Na sequência será apresentado uma descrição da kalimba, a física que a explica e sua construção e afinação. Também será apresentada a metodologia adotada na coleta e análise dos dados. Por fim, serão sugeridas possíveis aplicações nas aulas de Física do Ensino médio, nossas conclusões e perspectivas.

2 Kalimba

Kalimba, *mbira* ou piano de polegar é um instrumento de origem africana, comumente usado em rituais religiosos e peregrinações. Seu som lembra gotas e até mesmo água corrente, por isso, os povos tradicionais acreditam que a kalimba foi dada ao homem pelo deus das chuvas (HOLLANDA, 2013). A kalimba desempenha um papel fundamental na preservação cultural de alguns povos africanos, como, por exemplo cita Barnett (2012, p.2, tradução nossa), “está claro que para a cultura *Shona* a música proveniente da *mbira* desempenha efetivamente um papel sociocultural, ligando o povo à região através da natureza”.

Este instrumento pertence à família dos lamelofones e consiste em um conjunto de lâminas com uma extremidade fixa à um tampo de madeira e outra livre para oscilar. A partir do deslocamento causado pelos dedos, a tecla passa a vibrar em uma frequência (*i.e.* uma nota musical) determinada por seu comprimento; variando-o, obtém-se diferentes notas musicais (FELINTO; SILVA, 2016). As ondas são transferidas das teclas para o tampo por ressonância, assim ele passa a funcionar como um amplificador. Esse efeito é potencializado quando a kalimba é posicionada sobre uma cabaça, como mostra a Fig. 1, ou outra estrutura ressonante (SOUZA, 2011).

Figura 1: Kalimbas posicionadas junto às cabaças. Nesta figura nota-se que a kalimba é formada por um tampo de madeira, no qual são fixadas lâminas metálicas de diferentes comprimentos. Quando os instrumentos são colocados sobre as cabaças, o som é amplificado por um processo de ressonância.



Fonte: Holanda (2013).

Algumas kalimbas, como na Fig. 2, são confeccionadas com tampo incorporado ao ressoador em uma espécie de caixa de ressonância.

Figura 2: Kalimbas com caixas de ressonância. Nestas kalimbas, é incorporado ao tampo um ressoador, formando uma caixa de ressonância.



Fonte: Holanda (2013).

2.1 A Física da kalimba

A função que fornece a relação entre frequência do som e o comprimento da tecla em uma kalimba pode ser obtida a partir da equação de Euler-Bernoulli, que descreve vibrações transversais em lâminas finas (FLETCHER; ROSSING, 1991):

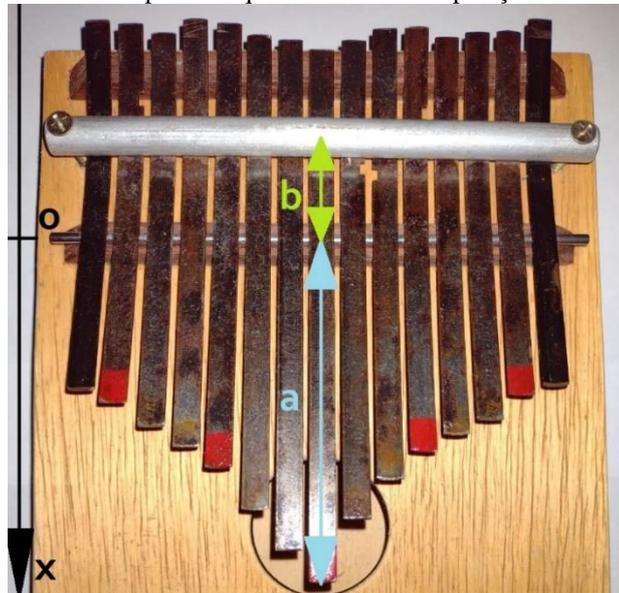
$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = - \frac{EK^2}{\rho} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}, \quad (1)$$

sendo t o tempo, x a distância ao longo da lâmina e y o deslocamento transversal. Os termos decorrentes das características da lâmina são o módulo de Young E , a densidade ρ e o raio de

giroação K^1 . No caso de uma lâmina com seção transversal retangular, K é definido como $h/\sqrt{12}$ (FLETCHER; ROSSING, 1991), em que h é a espessura da lâmina.

Para descrever uma kalimba é preciso considerar o comprimento "a" da tecla, que é a medida da extremidade livre até a parte apoiada no cavalete, e o comprimento "b", que é a medida da parte apoiada no cavalete até a extremidade fixa no suporte (CHAPMAN, 2012), como mostra a Fig. 3. Essa descrição passa a ser a soma de dois casos distintos, barra livre-apoiada e apoiada-presa. Para facilitar os cálculos, a origem do eixo x é escolhida como sendo o cavalete.

Figura 3: Divisão da tecla utilizada para a análise segundo equação de Euler-Bernoulli. Onde a (seta azul) é a distância da extremidade livre até o cavalete e b (seta verde) a distância do cavalete até o suporte. A origem de x foi escolhida no ponto O que coincide com a posição do cavalete.



A solução geral da Eq. (1) para os dois casos é dada pela Eq. (2) e (3), onde f é a frequência do movimento (CHAPMAN, 2012):

$$y(x,t)=[A \text{ sen } Kx+B \text{ senh } Kx+C \text{ cos } Kx+D \text{ cosh } Kx] \exp(-i2\pi ft) \quad (0 \leq x \leq a) \quad (2)$$

$$y(x,t)=[A' \text{ sen } Kx+B' \text{ senh } Kx+C' \text{ cos } Kx+D' \text{ cosh } Kx] \exp(-i2\pi ft) \quad (-b \leq x \leq 0) \quad (3)$$

¹ Raio de giroação é uma distância que, elevada ao quadrado e multiplicada pela massa do objeto analisado, resultará no momento de inércia do sistema (NUSSENZVEIG, 2002)

Aplicando as condições de contorno nas Eq. (2) e (3), obtém-se a Eq. (4) que define a relação entre frequência e comprimento da tecla. Os diferentes harmônicos possíveis² são determinados pelos valores de w , que por sua vez, são definidos por r (razão entre os segmentos a e b) (CHAPMAN, 2012).

$$f(a) = \frac{h}{4\sqrt{3}\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} w^2 \quad (4)$$

Observe na Eq. (4) que as frequências possíveis, são dependentes de várias grandezas físicas; no entanto, os harmônicos de uma determinada tecla dependem apenas de w , já que os outros fatores são constantes. Chapman (2012) faz o cálculo de w para os diferentes valores de r e enfatiza três casos especiais, sendo eles: $r \rightarrow 0$, $r \rightarrow 1$ e $r \rightarrow \infty$. Para a kalimba desenvolvida, o caso de maior proximidade é $r \rightarrow 1$. Neste caso, de acordo com a literatura, o valor de w para a frequência fundamental (frequência de maior intensidade) é $\pi/2$.

Assumindo este o caso para análise, é possível simplificar a Eq. (4) para uma constante que incorpora todas as demais constantes, incluído as constantes de tecla h , E e ρ , dividida por a^2 , conforme a Eq. (5):

$$f(a) = \frac{c}{a^2} \quad (5)$$

A Eq. (5) será utilizada tanto na comparação dos valores encontrados com a teoria, como para determinar os valores de comprimento das teclas para as notas musicais pretendidas.

3 Metodologia

Nos próximos tópicos, será descrito o processo de construção das kalimbas, as técnicas de coleta de dados, como os mesmos foram utilizados para afinar a $k1$ e as possibilidades de aplicação em salas de aula.

² Para mais detalhes consultar o artigo de Chapman (2012): The tones of the kalimba (African thumb piano).

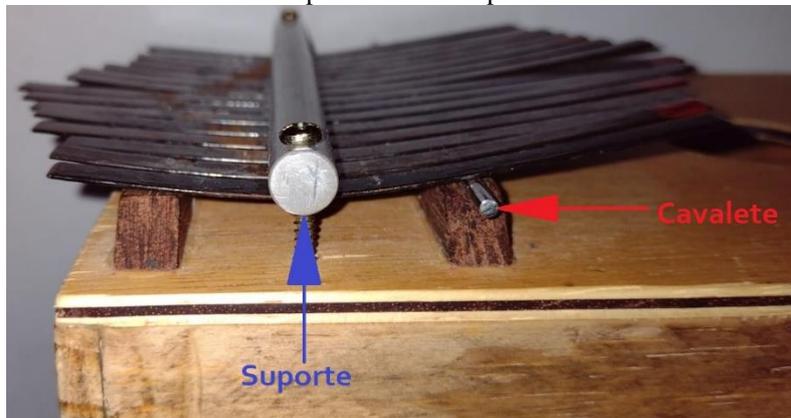
3.1 Construção

A construção da kalimba foi baseada em dois vídeos, um com caráter amador (FELLIPE, 2018) e outro mais profissional (LIMA, 2017); a partir deles, optou-se por desenvolver instrumentos com materiais de fácil acesso para professores e alunos.

Agora será descrito a construção da kalimba que possui caixa de ressonância de madeira, e posteriormente será descrito de forma breve as kalimba de cabaça e de tábua, doravante k1, k2 e k3, respectivamente. Esse processo se deu em duas partes: primeiro a montagem da caixa de ressonância e depois a fixação dos cavaletes e do suporte para as teclas.

A caixa de ressonância foi dimensionada com 21,5 cm de comprimento, 16,0 cm de largura e 3,5 cm de altura, com base em algumas kalimbas à venda *online*. Na Fig. 4 observa-se a madeira utilizada na tampa e nas laterais da k1 (compensado e pedaços de *pinus* com 4 e 6 mm de espessura, respectivamente). O furo central tem 3,8 cm de diâmetro.

Figura 4: Vista lateral da kalimba 1 com destaque para os cilindros utilizados no cavalete (proveniente de um *drive* de DVD) e no suporte (retirado de um puxador de persiana), indicados respectivamente pelas setas vermelha e azul. Também pode-se notar as partes de madeira utilizadas.



As teclas foram feitas com hastes de aço de 6,5 mm de largura e 0,80 mm de espessura; como suporte foi utilizado um cilíndrico de alumínio de 14,0 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro. Na fixação do suporte foram utilizados dois parafusos philips de rosca soberba de 3,5 mm de espessura que foram presos na tampa da caixa de ressonância; a região do tampo que sofre a tração dos parafusos, recebeu um reforço de madeira em sua parte interna.

As madeiras utilizadas são provenientes de uma porta e de uma gaveta. Os cilindros do cavalete e do suporte são, respectivamente, de um *drive* de DVD e de um puxador de persiana.

As teclas foram retiradas de limpadores de para-brisa. As ferramentas utilizadas foram uma serra de mão, furadeira, serra copo, lima e lixas para suavizar os cantos.

Com os mesmos procedimentos, foi possível desenvolver mais duas kalimbas: a k2, utilizando como caixa de ressonância uma cabaça, e a k3, que não possui caixa de ressonância, construída apenas com uma tábua de 10X20 cm, conforme a Fig. 5. A k2 foi afinada em D₆₄ da escala diatônica, enquanto a k3 permaneceu apenas com uma tecla longa, utilizada na fase de coleta de dados descrita no próximo tópico.

Figura 5: k2, de cabaça, já afinada em D₆₄ da escala diatônica e a k3, sem caixa de ressonância, em processo de medição das frequências.



3.2 Afinação

As escalas musicais mais utilizadas nas músicas ocidentais são a escala diatônica e a escala cromática, por isso foram escolhidas para as diferentes afinações utilizadas. A primeira escala possui sete notas, dó, ré, mi, fá, sol, lá e si, sendo dó a nota mais grave, e a segunda possui cinco notas adicionais que recebem o símbolo # (sustenido) para diferenciá-las, essa escala é formada pelas notas dó, dó#, ré, ré#, mi, fá, fá#, sol, sol#, lá, lá# e si (Teixeira, 2015).

O aplicativo utilizado para aferir as frequências foi o *Tuner-Pitched*, ele apresenta o primeiro múltiplo audível das escalas mencionadas como D₆₁, correspondendo a 33 Hz, e as demais notas aumentam a partir dele, conforme a Tab. 1, essa nomenclatura foi mantida ao longo do trabalho. Quando se multiplica a frequência de uma determinada nota por 2ⁿ (n sendo um número inteiro positivo), o som resultante é similar, diferenciando-se em mais grave ou mais agudo, ou seja, a sensação causada pela nota F₄₃, por exemplo, é diferenciada da nota F₄₅

apenas por sua altura. Por essa razão as frequências da Tab. 1 compõe a base para as demais notas trabalhadas.

Tabela 1: Nomenclatura utilizada pelo aplicativo *Tuner-Pitched* para descrever as primeiras notas das escalas diatônica e cromática.

| Nota musical | Frequência (Hz) |
|--------------|-----------------|
| Dó1 | 33,0 |
| Dó#1 | 34,9 |
| Ré1 | 37,0 |
| Ré#1 | 39,2 |
| Mi1 | 41,6 |
| Fá1 | 44, 1 |
| Fá#1 | 46,7 |
| Sol1 | 49,4 |
| Sol#1 | 52,4 |
| Lá1 | 55,5 |
| Lá#1 | 58,8 |
| Si1 | 62,3 |

Com o conjunto montado e o uso de um paquímetro, aferiu-se a distância b em 0,026 m. Foi inserido uma lâmina, deixada inicialmente com 0,09 m de comprimento livre para oscilar (a Fig. 5 ilustra esse processo com a k_3). O aplicativo de afinação *Tuner-Pitched* foi utilizado para medir a frequência sonora proveniente do toque da tecla. O comprimento foi diminuído em 0,005 m a cada repetição, até o comprimento de 0,025 m, registrando assim as respectivas frequências. Com esses dados, gerou-se o gráfico da Fig. 8, de frequência por comprimento de a . Após determinar os parâmetros da função, de acordo com a Eq. (5), o *software* utilizado forneceu a Eq. (6) como a curva de melhor ajuste.

$$f(a)=0,3484a^{-2} \quad (6)$$

Com os mesmos procedimentos, os valores de b para k_2 e k_3 são respectivamente 0,027 m e 0,028m. A Eq. (7) foi obtida a partir das medições na k_2 e a Eq. (8) na k_3 .

$$f(a)=0,3267a^{-2} \quad (7)$$

$$f(a)=0,3428a^{-2} \quad (8)$$

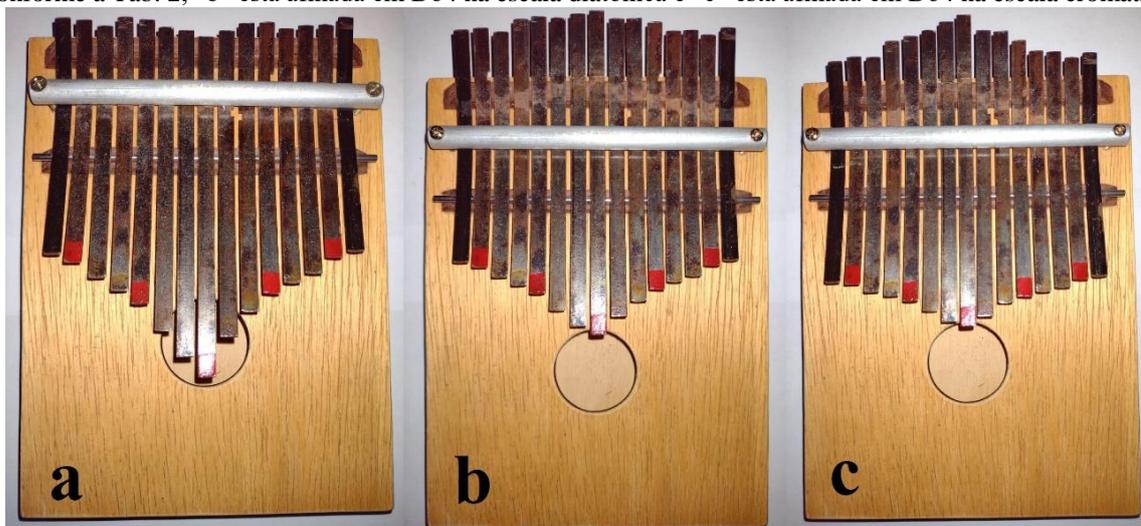
As Eqs. (6), (7) e (8) descrevem os dados com coeficiente de determinação, R^2 , acima de 93,8%, indicando que essas equações são boas representações dos fenômenos estudados.

Com base na Eq (6) e das frequências de cada nota pretendida para a afinação do instrumento, foram calculados os comprimentos cujas hastes, para possibilitar a afinação desejada. Esses valores estão organizados na Tab. 2. Algumas teclas foram pintadas com esmalte vermelho para facilitar a localização de cada nota, como mostra a Fig.6. Esta figura apresenta a mesma kalimba em três afinações diferentes, sendo “a” afinada em Dó3 da escala diatônica, conforme a Tab. 2, “b” afinada em Dó4 da escala diatônica e “c” afinada em Dó4 da escala cromática.

Tabela 2: Notas musicais utilizadas na afinação da kalimba 1, com suas respectivas frequências e comprimentos estimados pela Eq. (6).

| Nota musical | Frequência (Hz) | Comprimento (cm) |
|--------------|-----------------|------------------|
| Dó3 | 132,0 | 5,137 |
| Ré3 | 148,1 | 4,850 |
| Mi3 | 166,3 | 4,577 |
| Fá3 | 176,2 | 4,446 |
| Sol3 | 197,7 | 4,197 |
| Lá3 | 222,0 | 3,961 |
| Si3 | 249,2 | 3,739 |
| Dó4 | 264,0 | 3,633 |
| Ré4 | 296,2 | 3,429 |
| Mi4 | 332,6 | 3,236 |
| Fá4 | 352,4 | 3,144 |
| Sol4 | 395,5 | 2,968 |
| Lá4 | 444,0 | 2,801 |
| Si4 | 498,4 | 2,644 |
| Dó5 | 528,0 | 2,569 |

Figura 6: Kalimba de 15 teclas em diferentes afinações. “a” corresponde a afinação em Dó3 na escala diatônica, conforme a Tab. 2, “b” está afinada em Dó4 na escala diatônica e “c” está afinada em Dó4 na escala cromática.



As notas da Tab. 2, foram escolhidas de forma a permitir o maior número possível de afinações sem comprometer a qualidade do som (para comprimentos maiores o som emitido apresentava ruído excessivo) e o manuseio do instrumento (teclas muito longas em relação o comprimento do instrumento tornam difícil segura-lo nas mãos e dedilhar as teclas simultaneamente).

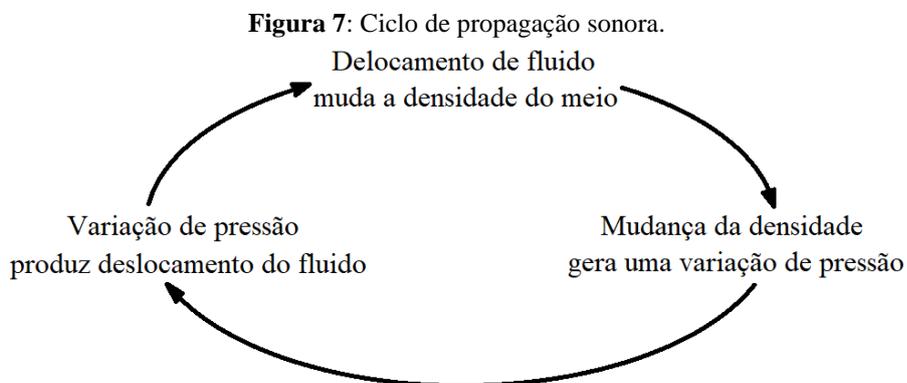
3.3 Possíveis aplicações

A kalimba pode ser trabalhada de forma interdisciplinar, uma possibilidade é propor que o aluno construa e decore sua própria kalimba em aulas de Artes, assim como mostra Ferrari *et al.* (2016) e, paralelamente, investigue seu funcionamento e determine alguma afinação nas aulas de Física.

O professor de Artes pode trabalhar conceitos musicais e estéticos relacionados a cultura africana e afrodescendente, e até mesmo organizar uma exposição das kalimbas confeccionadas e uma apresentação musical.

O professor de Física pode usar a afinação do instrumento como uma forma de investigar a relação entre a frequência e o comprimento da tecla, propondo ao final que o aluno calcule os comprimentos necessários a afinação pretendida. Para isso o aluno pode utilizar as teclas de metal ou de outros materiais (por exemplo palitos picolé). Isso possibilita analisar como as constantes h , E e ρ influenciam nas frequências encontradas, dado um mesmo comprimento de tecla.

O questionamento sobre como o som se forma e se propaga também pode ser feito. Sendo que o movimento da tecla provoca o deslocamento inicial do ar, iniciando o ciclo ilustrado pela Fig. 7.



Pode-se analisar de forma qualitativa a forma como o som é ampliado pela caixa de ressonância. Para isso pode ser feita a comparação entre a intensidade sonora para a $k1$ e $k3$. De acordo com Souza (2011), a energia é transmitida pelas vibrações através do cavalete para a caixa de ressonância, que passa a vibrar na mesma frequência que a tecla, gerando também um efeito de retroalimentação nas demais teclas. Com isso, pode-se colocar duas teclas de mesmo comprimento e tocar apenas uma, observando que, após alguns instantes, a outra passa a vibrar na mesma frequência.

Outro efeito de ressonância interessante, que pode ser demonstrado, é o fato de que cada sistema vibra em frequências específicas. A tecla oscila numa frequência determinada, não sendo necessariamente uma frequência possível para a caixa de ressonância. Nesses casos, o som cessa rapidamente, na medida que é a energia de vibração é absorvida pela caixa. Esse efeito pode ser observado na $k1$ em frequências próximas à 528 Hz (D65).

O fenômeno do batimento pode ser ilustrado a partir de duas teclas com comprimentos próximos. Tocadas simultaneamente, o aluno notará que a intensidade do som oscila em intervalos regulares; esses intervalos correspondem a diferença entre as frequências emitidas pelas teclas. Conhecendo a afinação de uma tecla e o intervalo de batimento, é possível determinar a afinação da outra tecla.

Por último, pode-se utilizar as três kalimba como forma de ilustrar o significado do timbre. Ao tocar a mesma nota em diferentes instrumentos é possível identificar diferenças nos sons emitidos. Isso também pode ser observado quando se utiliza teclas de materiais diferentes.

As possibilidades acima mencionadas são apenas sugestões, elas foram pensadas para futuras aplicações em salas do segundo ano do ensino médio. Em decorrência da pandemia de Covid19 não foi possível colocar essas ações em prática.

4 Resultados e discussão

Com base nos dados coletados, as Eqs. (6), (7) e (8) foram desenvolvidas, estabelecendo a relação de frequência e comprimento. De acordo com o coeficiente de determinação encontrado, essas equações são boas para descrever fenômeno estudado. Na afinação da k1, a Eq. (6) foi utilizada para calcular o comprimento de cada tecla, conforme os valores listados na Tab. 2. Como pode ser observado na Fig. 5, a k2 foi afinada utilizando a Eq. (7), conforme os valores listados na Tab. 3.

Tabela 3: Notas musicais utilizadas na afinação da kalimba 2, com suas respectivas frequências e comprimento estimado pela Eq. (7).

| Nota musical | Frequência (Hz) | Comprimento (cm) |
|--------------|-----------------|------------------|
| Dó4 | 264,0 | 3,518 |
| Ré4 | 296,2 | 3,321 |
| Mi4 | 332,6 | 3,134 |
| Fá4 | 352,4 | 3,045 |
| Sol4 | 395,5 | 3,015 |
| Lá4 | 444,0 | 2,713 |
| Si4 | 498,4 | 2,560 |
| Dó5 | 528,0 | 2,487 |

Para comparar com a teoria, os valores esperados de frequência foram calculados para cada comprimento medido, para tanto, foi considerado $E = 193 \text{ GPa}$, $\rho = 8030 \text{ Kg/m}^3$ (LENNTECH, 2021) e $w = \pi/2$, de acordo com o caso que melhor se ajusta aos valores de r .

Nos gráficos das Fig. 8, 9 e 10, foram inseridos os dados coletados e os valores esperados de frequência para cada medida, segundo a teoria, nota-se que conforme a frequência cresce, a diferença entre os valores aumenta, esse fenômeno pode ser atribuído a imprecisão de E e ρ (por se tratar de materiais adaptados, não foi possível determinar, com exatidão, os valores de tais constantes).

Figura 8: Gráfico de frequência por comprimento da tecla para a kalimba 1 comparado com os valores teóricos.

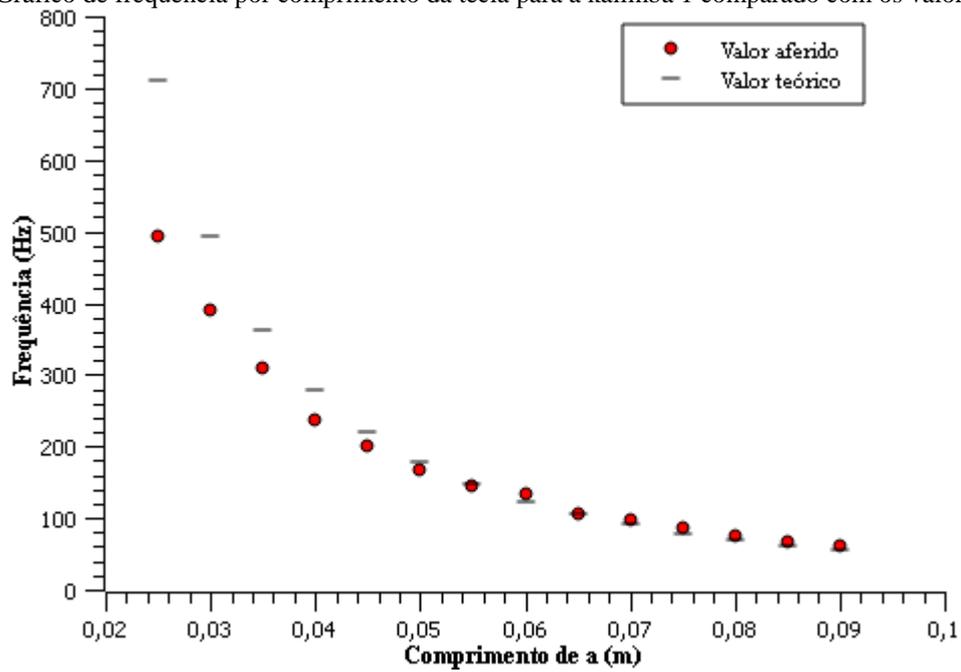


Figura 9: Gráfico de frequência por comprimento da tecla para a kalimba 2 comparado com os valores teóricos.

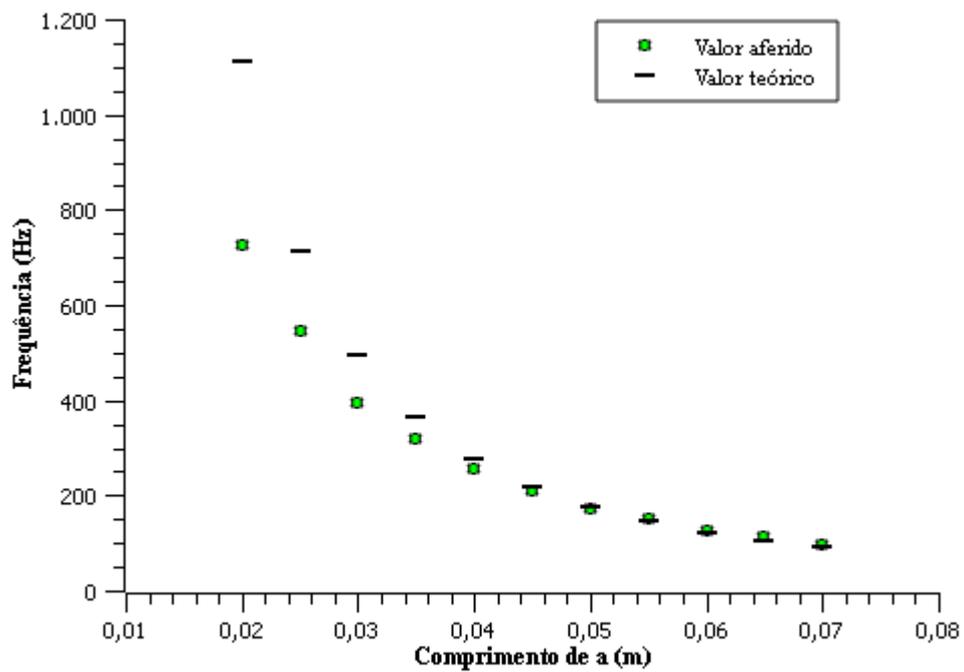
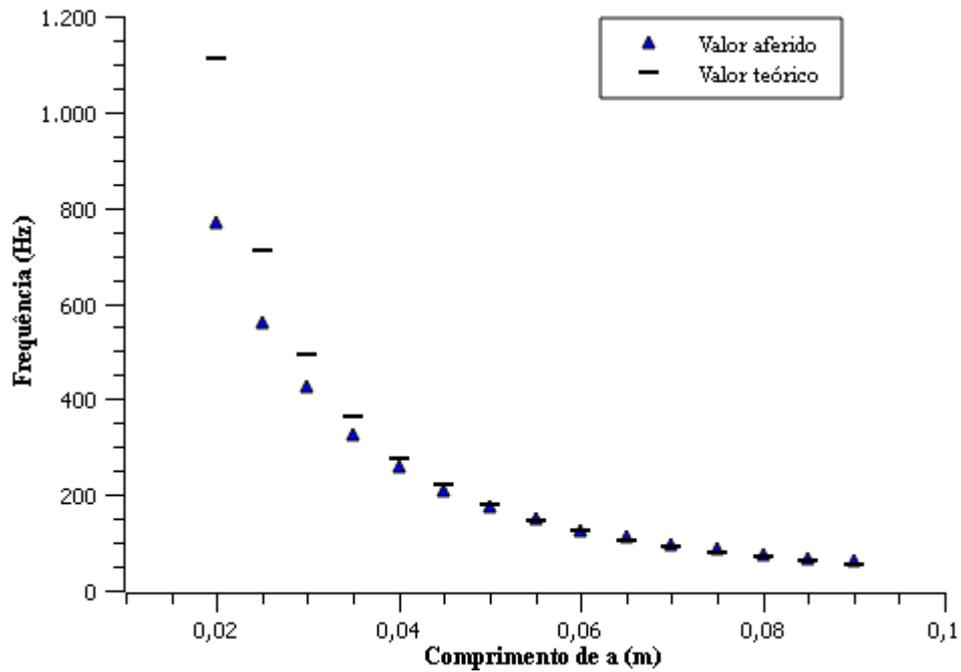
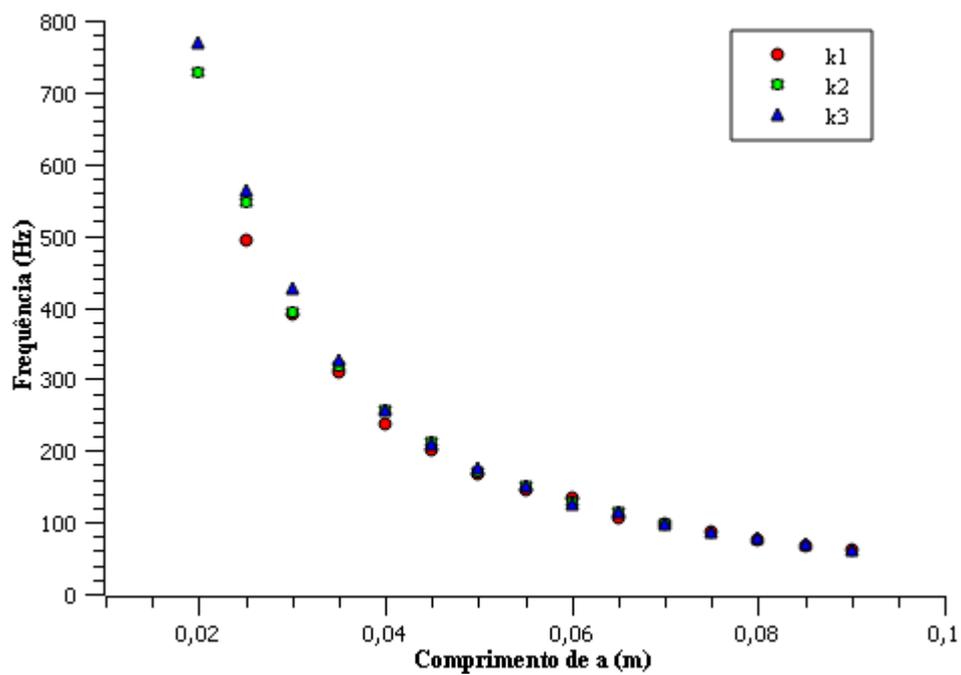


Figura 10: Gráfico de frequência por comprimento da tecla para a kalimba 3 comparado com os valores teóricos.



Na Fig. 11 foram agrupados os resultados das medidas nas diferentes kalimba. Com ele evidencia-se que a estrutura ressonante exerce pouca influência na frequência emitida, fato que é corroborado pela Eq. (4), que só leva em consideração as características físicas da lâmina.

Figura 11: Gráfico de frequência por comprimento da tecla para k1, k2 e k3.



5 Conclusão e perspectivas

Apesar das kalimbas desenvolvidas serem feitas de materiais adaptados, isso não trouxe prejuízo ao funcionamento dos instrumentos, uma vez que os resultados obtidos são próximos dos valores esperados segundo a teoria, principalmente quando se considera frequências inferiores a 500 Hz.

Agrupando os resultados obtidos nas diferentes kalimbas, evidencia-se que a frequência só depende das características físicas da tecla e que variações na caixa de ressonância não causam alterações significativas.

Através da construção e afinação de uma kalimba, é possível desenvolver aulas interdisciplinares entre Física e Artes. O professor pode explorar conceitos musicais e estéticos relacionados à cultura africana e afrodescendente. Ao mesmo tempo em que, nas aulas de Física, o aluno investiga a relação entre frequência sonora e comprimento de tecla, encontra a função matemática que a descreve e determina uma possível afinação do instrumento.

Existem diversos conceitos físicos possíveis de serem trabalhados utilizando esse instrumento, neste trabalho foi apresentado cinco possibilidades sendo elas a própria relação de frequência e comprimento, o mecanismo de propagação do som, o fenômeno de ressonância, batimento e timbre.

Devido ao isolamento social decorrente da pandemia de Covid19, não foi possível utilizar essa ferramenta em salas de aula para avaliar sua eficiência. Como próximos passos pretende-se implementá-la em turmas do segundo ano do ensino médio, como forma de ensino por experimentação.

Referências

BARNETT, Coralie Hancock. Colonial resettlement and cultural resistance: the mbira music of Zimbabwe. *Social & Cultural Geography*, Vol. 13, No. 1, 2012.

CHAPMAN, David M. F. The tones of the kalimba (African thumb piano). *Acoustical Society of America*, Am. 131 (1), Pt. 2. p. 945–950, 2012.

DARROZ, Luiz Marcelo; ROSA, Cleci Werner da; GHIGGI, Caroline Maria. Método tradicional x Aprendizagem significativa: Investigação na ação dos professores de física. **Aprendizagem Significativa em Revista**, Passo Fundo/RS, V5, pp. 70-85, 2015.

FELINTO, Renata Aparecida; SILVA, Salomão Jovino. Marimbas ou Kalimbas: Instrumentos musicais africanos. In: Especialização em Política de promoção da igualdade racial na escola: Módulo 3 - Educação e relações étnico-raciais. São Paulo: Universidade Federal de São Paulo - Pró-Reitoria de Extensão, 2016, p 28.

FELLIPE, Leandro. Como fazer uma kalimba com tubos de PVC!. Youtube, 2018. Publicado Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=g0B3orpwLJI>>. Acesso em 17/06/21.

FERRARI, S. d., Sardo, D. L., Sardo, F., & Ferrari, P. F.. Matérias da arte. **Arte por toda parte**. 2ª edição. São Paulo: FTD, 2016. Cap 4, p. 144-195.

FLETCHER, Neville H; ROSSING, Thomas D. Continuous Systems in One Dimension: Strings and Bars. In: **The Physics of Musical Instruments**. Nova York, Springer-Verlag, 1991. Capítulo 2, p. 33-64.

GONÇALVES, R. N. S.; ANDRADE, J. E., OLIVEIRA; R. A. P.; A aprendizagem através de experimentos no Ensino de Física. **Scientia Plena**, Local de publicação, vol. 13, num 01, 2017.

HOLLANDA, Ariel Leite de. Um estudo sobre o ensino da kalimba. 2013. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Música) –Instituto de Artes, Unicamp. Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas, 2013.

LENNTECH, stainless steel 304. Delft, Holanda. Disponível em: <<http://www.lenntech.com/stainlessteel-304.htm>> Acesso em: 20/10/21.

LERIAS, Washington Roberto. A física da música e a pluralidade didática. 2016. 72 f. Dissertação de mestrado apresentada ao Programade Pós-Graduação da UTFPR de Campo Mourão no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF). Campo Mourão. 2016. Disponível em:

<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2686/1/fisicamusicapluralidadededidatica.pdf>>.

Acesso em: 16/10/2021.

LIMA, Markus. Kalimba - piano de mão - como fazer. Youtube, 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=KSzECCs5rMU>>. Acesso em 17/06/21.

MOREIRA, Marco Antonio. Uma análise crítica do ensino de Física. Estudos Avançados, v.32, n. 94, p. 73-80, 2018.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. Título do capítulo. In: _____. **Curso de física básica: Mecânica**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2001. Cap 12, p. 248-283.

PINTO, José Marcelino de Rezende. O que explica a falta de professores nas escolas brasileiras? **Jornal de políticas educacionais**, N° 15, p. 03-12, 2014.

SANTOS, Emerson Izidoro; PIASSI, Luís Paulo de Carvalho; FERREIRA, Norberto Cardoso. Atividades experimentais de baixo custo como estratégia de construção da autonomia de professores de física: uma experiência em formação continuada. In: Encontro nacional de pesquisa em ensino de física, IX, 2004, Jaboticatubas.

SOUZA, Rodolfo Coelho. Um modelo de kalimba em csound usado em o livro dos sons. **Música Hodie**, Vol. 11, N° 1, 2011.

TEIXEIRA, Alexandre Carlos da Silva. **Matemática na Música: A Escala Cromática e as Progressões Geométricas**. 2015. 78 f. Programa de Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional - Universidade Federal de Goiás, Regional Catalão, 2015.