



DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE SINAIS PARA MEDIÇÃO DE FORÇA DE MORDIDA DE SERES HUMANOS

Elizabeth Akemi Fujito^[0000-0002-9849-4584], Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil, eafujito@gmail.com

Rudolf Huebner^[0000-0003-2613-304X], Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil, rudolf@demec.ufmg.br

Orlando Santiago Junior^[0000-0002-0541-7708], Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil, osjofm@gmail.com

Hegler Kelser de Araujo Rocha^[0000-0001-9124-9343], Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicação, Belo Horizonte, MG, Brasil,

hk4@pucminas.com

Eduardo José Lima II^[0000-0002-0089-5743], Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Automação, Belo Horizonte, MG, Brasil, eduardojoselima@ufmg.br

Resumo. Os primeiros estudos experimentais de força interoclusal datam do século XVII e XIX, originando o Gnatodinamômetro. O Gnatodinamômetro é um dispositivo que está sendo desenvolvido para a aquisição e tratamento de sinais, a fim de medir a força de mordida de seres humanos. O dispositivo é composto do extensômetro de 120 ohms que capturará a força de mordida do paciente; o sinal será enviado ao Arduino Nano e visualizado no display de LCD. Os dados obtidos serão armazenados no cartão micro SD para posterior elaboração de relatórios. Espera-se com esse projeto, obter um dispositivo de baixo custo, capaz de mensurar a força de mordida dos pacientes, gerar um relatório com os dados coletados e após análise, encaminhar os pacientes para o devido tratamento odontológico. A análise dos dados poderá também contribuir para a melhoria das políticas de saúde oral.

Palavras chave: Gnatodinamômetro. Força de mordida. Extensômetro. Arduino Nano. HX711.

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos experimentais de força interoclusal foram realizados por Borelli em 1681 e Black em 1893. O estudo da força de mordida possibilita avaliar tratamentos odontológicos e diagnosticar anormalidades na arcada dentária dos pacientes, tendo se tornado cada vez mais uma medida comum de desempenho, auxiliando profissionais da área odontológica, segundo KOC, D.; DOGAN, A.; BEK, B. (2010). Inicialmente, o estudo da força de mordida teve como principal objetivo avaliar as propriedades físicas dos materiais a serem utilizados na odontologia, conforme BLACK, G.V. (1895). A OBF (*Occlusal Bite Force*) é entendida como o esforço exercido entre os dentes superiores e inferiores quando a mandíbula é elevada pelos músculos mastigatórios, segundo VILELA, M. et al. (2017). Ela aumenta com a idade começando na infância, mantém-se constante dos 20 aos 40 anos e então declina, conforme OWAIS, A. I.; SHAWEESH, M.; ABU ALHAIJA, E. S. J. (2013). A OBF pode ser medida utilizando-se um transdutor adequado posicionado entre um par de dentes, segundo KOC, D.; DOGAN, A.; BEK, B. (2010).

A força de mordida é uma importante ferramenta para avaliar o estado funcional do sistema mastigatório e foi utilizada para avaliar a função oral em diferentes má oclusões, nas cirurgias orais, nas disfunções temporomandibulares e nas doenças neuromusculares, conforme VILELA, M. et al. (2017). Desta forma, o estudo da força de mordida pode diagnosticar distúrbios no sistema estomatognático, segundo SUBRAMANIAN, P.; GIRISH BABU, K.L.; IFZAH. (2016), avaliar o efeito do tratamento ortodôntico na correção da má oclusão, conforme KOC, D.; DOGAN, A.; BEK, B. (2010), compreender os mecanismos da mastigação a fim de avaliar os efeitos terapêuticos de dispositivos protéticos, segundo VILELA, M. et al. (2017), entre outros. A força de mordida pode sofrer influência de acordo com a morfologia craniofacial, sexo, idade, número de dentes e sintomas de desordem temporomandibular, conforme KOC, D.; DOGAN, A.; BEK, B. (2010). Medidas de força de mordida também são propensas a variações de métodos experimentais, incluindo *design* do instrumento, a abordagem feita pelo pesquisador, o grau de cooperação da criança participante, a posição da cabeça, segundo MOUNTAIN, G.; WOOD, D.; TOUMBA, J. (2011) e a presença de dor e desordem temporomandibular, ou mesmo se a medição é unipolar ou bipolar, conforme KOC, D.; DOGAN, A.; BEK, B. (2010).

Existe uma variedade de métodos para medir a força de mordida humana, como o dispositivo de mola, os dispositivos de alavanca-mola, manômetro-mola e alavanca, dispositivos micrometros e extensômetros, segundo KOC, D.; DOGAN, A.; BEK, B. (2010), dispositivos de pressão hidráulico, conforme OWAIS, A. I.; SHAWEESH, M.; ABU ALHAIJA, E. S. J. (2013) e sistema de pré-escala odontológico, segundo SUBRAMANIAN, P.; GIRISH BABU, K.L.; IFZAH. (2016).

O elevado custo dos dispositivos existentes no mercado, nos motivou a buscar novas alternativas para realizar as medições das forças de mordida. O dispositivo tem como intuito ser compacto, de fácil manuseio e ter baixo custo de produção.

2. OBJETIVO

Desenvolver um Sistema de Aquisição e Tratamento de Sinais para Medição da Força de Mordida de Seres Humanos, com o intuito de auxiliar profissionais da área odontológica a diagnosticar anormalidades na arcada dentária dos pacientes, através da medição da força de mordida dos mesmos.

3. METODOLOGIA

O Gnatodinamômetro é um dispositivo que está sendo desenvolvido para aquisição e tratamento de sinais, a fim de medir a força de mordida de seres humanos. Testes realizados com extensômetros utilizando CAD (*Computer Aided Design*)/CAM (*Computer Aided Manufacture*) e FEM (*Finite Element Method*) mostraram que esses dispositivos são adequados para medições de força de mordida, além de apresentarem baixo custo. Portanto foram selecionados para serem utilizados neste projeto.

O extensômetro capturará a força de mordida do paciente, e o sinal será encaminhado para Ponte de Wheatstone que mensurará a variação da resistência na forma de tensão. Devido ao baixo valor de tensão fornecido pela Ponte de Wheatstone, fez-se necessário o uso do módulo conversor HX711, que amplificará e digitalizará o sinal. O sinal digitalizado será enviado ao Arduino Nano, que o processará para ser visualizado no *display* de LCD 16x2 I2C. Os dados obtidos serão armazenados no cartão micro SD para posterior elaboração dos relatórios.

O Gnatodinamômetro é composto por Arduino Nano da ATMEL CORPORATION (2021), módulo A/D 24 bits HX711 da AVIA SEMICONDUCTOR (2021), extensômetros 120 ohms da MICRO MEASUREMENTS (2021), Ponte de Wheatstone, *display* de LCD 16x2 I2C da HANDSONTEC (2021), *Real time clock* RTC DS3231 da MAXIM INTEGRATED (2021) e cartão micro SD da KINGSTON (2021).

Segundo KOBAYASHI F.Y. et al.(2012), o dispositivo de medição da força de mordida também deve assegurar:

- . suficiente força no dispositivo para resistir a carga máxima estimada
- . o transdutor deve caber na boca
- . a mordida no transdutor deve ser indolor e desconfortável.

3.1. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

A grandeza física a ser medida neste projeto é a força, em Newton. Essa grandeza será medida utilizando o extensômetro. Inicialmente foram realizados testes com extensômetros comerciais e extensômetros de nanotubo de carbono, a fim de selecionar o que apresentasse melhor desempenho para as medições.

- . Teste com sensor de 120 ohms utilizando tira de alumínio. Fig. (1) e Tab. (1).

Tabela 1. Medições com o extensômetro de 120 ohms, o autor (2021)

Peso (gramas)	Resistência (Ω)
58	120,8
73	120,8
105	120,8
190	120,8
500	120,9
1000	121,1

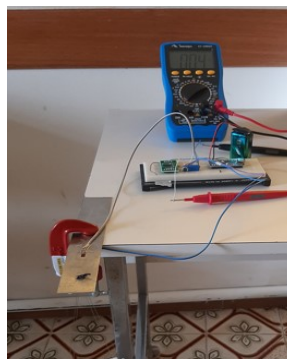


Figura 1. Teste com extensômetro de 120 ohms, o autor (2021)



O mesmo teste foi realizado com os extensômetros de 350 ohms e nanotubo de carbono. Apesar do extensômetro de nanotubo de carbono apresentar maior sensibilidade, foi detectado a presença de histerese. Portanto selecionamos o sensor de 120 ohms, que demonstrou ter mais sensibilidade do que o sensor de 350 ohms, além de ser menos propenso a corrente parasitária reduzindo assim o efeito da umidade, segundo UNIVERSIDADE VIRTUAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2021).

Posteriormente, foram realizados testes com quantidades diferentes de extensômetros: 1, 2 e 4, a fim de obter a melhor configuração da Ponte de Wheatstone. O circuito $\frac{1}{2}$ Ponte, com 2 extensômetros, configurados de tal forma que um sofra contração e o outro alongamento, pareceu ser a melhor configuração por compensar o efeito da temperatura, segundo UNIVERSIDADE VIRTUAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2021), e apresentar uma boa resposta linear, conforme demonstra a Eq. (1) de EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS (2022).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{GF \times \epsilon}{2} \quad (1)$$

Sendo V_o a tensão de saída na Ponte de Wheatstone, V_i a tensão da fonte, GF o *Gage factor* e ϵ a deformação.

Os testes estão sendo realizados conforme diagrama do Gnatodinamômetro na Fig. (2). Pesos de valores conhecidos foram colocados nos extensômetros, a fim de realizar a calibração do dispositivo.

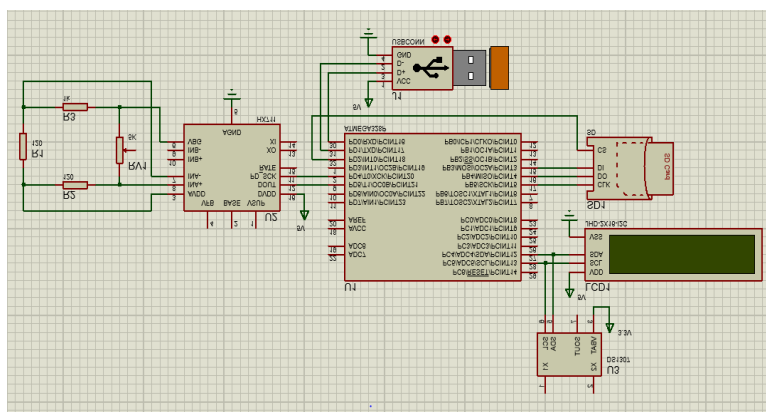


Figura 2. Diagrama do Gnatodinamômetro, o autor (2021)

Os códigos do Arduino Nano estão sendo desenvolvidos na plataforma Arduino IDE, sendo utilizados também cabos jumpers, próprios para uso no Arduino, fonte de 9V ou conector USB.

Neste projeto, aplica-se a lei de Hooke que refere à deformação elástica. A deformação do extensômetro causará a variação da corrente, que por sua vez variará a tensão da Ponte de Wheatstone. Essa tensão será convertida em Newton, obtendo desta forma, a força de mordida do paciente.

3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O extensômetro laminar ou *Strain Gauge* é um dispositivo resistivo utilizado para medir deformações em corpos de prova sólidos, quando submetidos a uma força ou pressão. Ao ser fixado no objeto de interesse, o extensômetro sofre a mesma deformação do objeto, variando assim a sua resistência. Essa variação é então medida pela Ponte de Wheatstone na forma de tensão. O princípio básico do extensômetro foi demonstrado por Lord Kelvin em 1856, segundo UNIVERSIDADE VIRTUAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2021). Esse dispositivo é composto de um material condutor (ou semiconductor) depositado sobre um filme isolante, Fig. (3).

Estrutura de um strain gauge

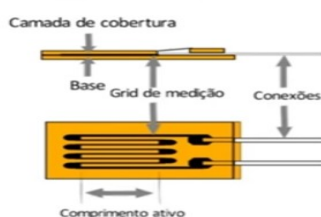


Figura 3. Extensômetro, HBM (2020)

Deformações no condutor alteram sua resistência elétrica que podem ser medidas através da segunda lei de Ohm Eq. (2), conforme EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS (2022). A alteração na resistência do extensômetro (expressa como a mudança na tensão) é proporcional à quantidade da sua distorção, segundo VUUREN L.J. (2020).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Sendo R a resistência elétrica de um fio condutor, ρ a resistividade do material condutor, L o comprimento do fio e A a área da seção transversal do fio.

A deformação do extensômetro na direção das linhas (eixo de maior sensibilidade), Fig. (4), é expressa pela Eq. (3), conforme EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS (2022).

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (3)$$



Figura 4. Funcionamento do extensômetro, HBM (2020)

Segundo NILSSON J.W.; RIEDEL S.A. (2015), existem diversas configurações de circuitos para medir a resistência, dentre elas a Ponte de Wheatstone. Esse circuito é usado para medir, com precisão, resistências de valores médios na faixa de 1Ω a $1M\Omega$, com precisão da ordem de $\pm 0,1\%$. O circuito da Ponte de Wheatstone consiste de 4 resistores, uma fonte de tensão CC e um detector. A resistência de um dos quatro resistores pode ser variável, conforme R_3 mostra na Fig. (5). De modo geral a fonte é uma bateria V_i mas, neste projeto, a fonte também poderá vir do Arduino Nano. O detector é um multímetro que medirá a tensão na Ponte de Wheatstone. A Figura (5) mostra o arranjo do circuito das resistências, bateria e o multímetro.

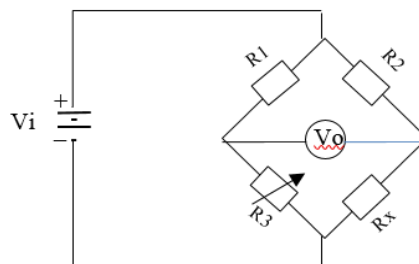


Figura 5. Ponte de Wheatstone, Nilsson (2015)

O HX711 é um conversor analógico-digital de 24 bits que interfaceia diretamente com a Ponte de Wheatstone. Possui 2 canais de amplificação de ganho: canal A com ganho programável de 64 a 128, e canal B com ganho fixo de 32, segundo AVIA SEMICONDUCTOR (2021). O Arduino Nano foi desenvolvido e produzido pela Gravitech, possui 8 entradas analógicas, 14 entradas digitais e um microcontrolador Atmega328P, conforme ATMEL CORPORATION (2021). O *display* de LCD 16x2 comporta o módulo I2C, possibilitando a ocupação de apenas 2 portas digitais do microcontrolador, segundo HANDSONTEC (2021); e o módulo *Real time clock* RTC DS3231 permite registrar a data e a hora de cada medição realizada, conforme MAXIM INTEGRATED (2021).

Testes foram realizados utilizando tiras de alumínio e tiras de aço inoxidável. As primeiras medições foram feitas com um Multímetro MINIPA de $3 \frac{1}{2}$ dígitos na escala de mV. Mas, por não apresentar variações significativas nas medições foi necessário mudar para um multímetro mais preciso: o Multímetro Digital 34401A AGILENT de $6 \frac{1}{2}$ dígitos. A montagem do protótipo foi feita no *proto board*.

3.3. COLETA DE DADOS

O paciente fará 6 mordidas no aparelho, sendo que a primeira mordida será para a adaptação do usuário ao aparelho. A literatura recomenda o intervalo de 30 segundos entre cada mordida, a fim de evitar fadiga. Desta forma serão obtidos os valores da força máxima e a média das forças de mordida. Cada paciente terá a força de mordida medida em 4 dentes: dente anterior de cada lado e dente posterior de cada lado, sendo que para cada dente serão realizadas 5 medições.

Os dados obtidos pelo Gnatodinamometro serão disponibilizados no *display* LCD 16x2 I2C e registrados no cartão SD, gerando um relatório por paciente.

4. RESULTADOS

Testes realizados com extensômetros utilizando CAD/CAM e FEM mostraram que esses dispositivos são adequados para medições de força de mordida, além de apresentarem baixo custo. Portanto foram selecionados para serem utilizados neste projeto.

Até o presente momento, obteve-se a curva do extensômetro de 120 ohms para pequenas cargas, conforme Fig. (7). Pesos de valores conhecidos, foram colocados sob o sensor e as tensões na Ponte de Wheatstone foram medidas pelo multímetro. Verificou-se que o resultado apresentou uma boa linearidade das leituras.

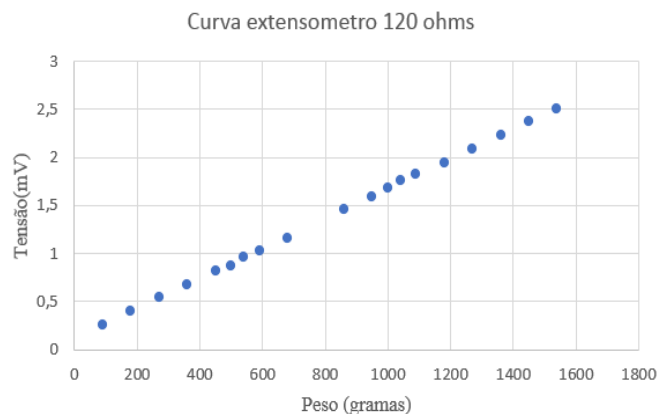


Figura 7. Curva do extensômetro 120 ohms com 2 sensores, o autor (2022)

5. DISCUSSÃO

Inicialmente, os testes foram realizados em tiras de alumínio, mas foram substituídos por tiras de aço inoxidável por apresentarem características semelhantes ao objeto onde será feita a mordida pelos pacientes. Optou-se pelo sensor de 120 ohms, por apresentar maior sensibilidade. A configuração de $\frac{1}{2}$ Ponte de Wheatstone se mostrou mais favorável, sendo utilizados 2 extensômetros de 120 ohms, reduzindo o custo do projeto, se comparado com o circuito de Ponte de Wheatstone completa.

O comportamento dos dados do sensor de 120 ohms, segue uma tendência linear assim como os resultados apresentados por Vuuren et al (2020). No sensor de nanotubo de carbono foi detectada a presença de histerese, como Koc D. et al (2010) comentou sobre os problemas associados aos sensores de força de mordida, em estudos utilizando resistores de detecção de força.

O desafio atual é a calibração do sensor: obter o valor exato da escala para fazer as medições.

Esse projeto pode ser expandido utilizando-se IoT (internet das coisas), onde os dados obtidos poderão ser disponibilizados em tempo real em um dispositivo móvel. Uma outra forma de armazenar os dados coletados seria através do módulo Wi-Fi Esp8266 Esp-01. Com este módulo, os dados poderiam ser armazenados na nuvem.

6. CONCLUSÃO

O legado deste projeto é facilitar ao profissional da saúde avaliar anomalias na arcada dentária do paciente através do relatório gerado pelo Gnatodinamômetro, possibilitando encaminhar o paciente para o tratamento adequado, bem como contribuir para melhoria de políticas de saúde oral; tudo isso a um reduzido custo do dispositivo.

O extensômetro de 120 ohms mostrou ser o mais adequado para medições por apresentar boa sensibilidade, boa resposta linear e por ser menos propenso à corrente parasitária. O extensômetro de nanotubo de carbono, embora



apresentasse melhor sensibilidade, foi detectada histerese. A Ponte de Wheatstone na configuração de $\frac{1}{2}$ ponte mostrou ser a mais adequada para o projeto. Desta forma, o Gnatodinômetro será composto por sensores de 120 ohms na configuração de $\frac{1}{2}$ Ponte de Wheatstone, HX711, Arduino Nano, display de LCD 16x2 I2C, Real time clock RTC DS3231 e cartão micro SD.

O reduzido custo do aparelho permitirá que mais pessoas possam ter acesso a ele, possibilitando assim a criação de um Banco de Dados Nacional, contribuindo desta forma com a ciência que poderá obter uma melhor avaliação da força de mordida.

7. REFERÊNCIAS

- [1]ATMEL CORPORATION. Datasheet: ATmega328P. Electronic Publication,2009. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/313218/ATMEL/ATmega328P.html>>. Acesso em: 15 mai. 2021.
- [2]AVIA SEMICONDUCTOR. Datasheet: HX711. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132222/AVIA/HX711.html>>. Acesso em: 10 jun. 2021.
- [3]BLACK, G.V. An Investigation of the physical characters of the human teeth in relation to their diseases, and to practical dental operations together with the physical characters of filling materials. **The Dental Cosmos**, 1895, v.37, pp.469-484.
- [4]EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS. Disponível em https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3086/Extensometros_eletricos.pdf. Acesso em: 15 fev. 2022.
- [5]HANDSONTEC. Datasheet LCD com I2C. Disponível em: <http://www.handsontec.com/dataspecs/module/I2C_1602_LCD.pdf>. Acesso em 20. mai. 2021.
- [6]HBM Test and Measurement. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/7328/video-como-um-strain-gauge-eletrico-funciona/>>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- [7]KINGSTON. Datasheet: micro cartão SD. Disponível em: <https://www.kingston.com/datasheets/SDCIT-specsheet-8gb-32gb_en.pdf>. Acesso em 20 mai. 2021.
- [8]KOBAYASHI F.Y. et al. Evaluation os masticatory performance and bite force in children with sleep bruxism. **Journal of Oral Rehabilitation**, May 2012, v.39, pp.776-783.
- [9]KOC, D.; DOGAN, A.; BEK,B. Bite Force and Influential Factors on Bite Force Measurements: A Literature Review **European Journal of Dentistry**, Uttar Pradesh, April 2010, v.4.
- [10]MAXIM INTEGRATED. Datasheet DS3231. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/575390/MAXIM/DS3231.html>>. Acesso em: 30 mai. 2021.
- [11]McRoberts, M. **Arduino Básico**, 2ª edição. São Paulo: Novatec Editora Ltda,2015. Cap.15, p.416.
- [12]MICRO MEASUREMENTS. Disponível em: <<https://docs.micro-measurements.com/?id=2602&ga=2.124344846.507787588.1644236139-1721307476.1644236139>>. Acesso em 20 jun. 2021.
- [13]MOUNTAIN, G.; WOOD, D.; TOUMBA, J. Bite force measurement in children with primary dentition. **International Journal of Pediatric Dentistry**, March 2011, Vol.21(2), pp.112-118
- [14]NILSSON J.W.; RIEDEL S.A. **Circuitos elétricos**, 10ª edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda, 2015. Cap.3, p. 74-75.
- [15]OWAIS, A. I.; SHAWEEESH, M.; ABU ALHAIJA, E. S. J. Maximum occlusal bite force for children in different dentition stages. **The European Journal of Orthodontics**, 2013, Vol. 35(4), pp.427-433
- [16]SUBRAMANIAN, P.; GIRISH BABU, K.L.; IFZAH. Effect of Restoring Carious Teeth on Occlusal Bite Force in Children. **The Journal of Clinical Pediatric Dentistry**, 2016, v.40, n.4.
- [17]UNIVERSIDADE VIRTUAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Disponível em:<https://youtu.be/XFP0ElgeQY>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- [18]VILELA, M. et al. Força de mordida em crianças com mordida cruzada posterior. **Audiol Commun Res**.2017;22:e1723.
- [19]VUUREN L. J. Maximum voluntary bite force, occlusal contact points and associated stresses on posterior teeth. **Journal of the Royal Society of New Zealand**. 2020, Vol.50, n.1, 132-143

8. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais e à CAPES pelo suporte financeiro via código de programa 32001010016P4.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.