

Modelagem tridimensional da mandíbula mesodivergente utilizando a abordagem ortodôntica de nivelamento da curva de Spee.

Isabelle M. Ikuno^{1,2}, Marcília V. Guimarães¹, Leonardo M. Machado¹, Pedro Y. Noritomi¹

¹Laboratório Aberto de Impressão 3D – LAPRINT
CTI Renato Archer – Campinas/SP

²Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – Campinas/SP

{isabelle.ikuno, mvguimaraes, leonardo.machado, pedro.noritomi}@cti.gov.br

Abstract. *The association between engineering and the healthcare field assists in understanding various phenomena of the human body, including its mechanical behavior. One of the ways to analyze this is through computational modeling and simulation based on anatomical landmarks. In this context, the article explores the utilization of three-dimensional modeling through CAD (Computer Aided Design) software in the field of dentistry, particularly in the orthodontic procedure of leveling the Spee curve, a line that influences dental occlusion. The purpose is to subsequently subject these models to simulation and gain a better understanding of the physical phenomena related to the effects of this leveling on mandibular tissues.*

Resumo. *A associação entre a engenharia e a área de saúde auxilia na compreensão de diversos fenômenos do corpo humano, incluindo seu comportamento mecânico. Uma das formas de analisar isso é pela modelagem e simulação computacional com base em marcos anatômicos. Nesse contexto, o artigo explora a utilização da modelagem tridimensional através do software CAD (Computer Aided Design) no âmbito da odontologia, em particular no procedimento ortodôntico de nivelamento da curva Spee, uma linha que influencia a oclusão dental. A finalidade é, posteriormente, submeter esses modelos à simulação e obter uma melhor compreensão dos fenômenos físicos relacionado aos efeitos desse nivelamento nos tecidos mandibulares.*

1. Introdução

Dentre os inúmeros projetos em que pode-se fazer em um software CAD, a modelagem tridimensional se destaca quando se é aliada à engenharia e à área da saúde. Seus amplos recursos tornam possível a criação de marcos anatômicos fundamentados em estruturas reais (Jardini *et al.*, 2014, Vázquez *et al.*, 2020, SolidWorks, 2023) e que, a partir da análise de elementos finitos, possam prever o comportamento mecânico efetivo, como o deslocamento e a distribuição de tensões (Qahtani and El-Anwar, 2018, Papadopoulou *et al.*, 2013). Em muitos casos, essa análise se revela fundamental para se obter um melhor entendimento dos fenômenos físicos (Qahtani and El-Anwar, 2018).

Desta maneira, muitos estudos de análise computacional são feitos na área de odontologia (Trivedi, 2014), incluindo a análise mais detalhada de procedimentos ortodônticos existentes, como o nivelamento da curva Spee. Essa é definida por Hitchcock (1983) como uma linha que se inicia na cúspide mais distal do segundo molar inferior, tangencia as cúspides dos dentes intermediários e termina na borda incisal dos incisivos, como pode ser identificado na Figura 1. A prática é muito recorrente nas clínicas odontológicas (Praeter *et al.*, 2002) e tem como finalidade proporcionar ao indivíduo uma boa oclusão dental (Andrews, 1972, Preston *et al.*, 2008).

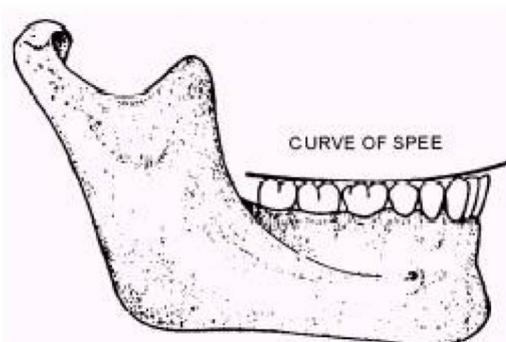


Figura 1. Representação da curva Spee.

Sendo assim, sob a perspectiva de compreender melhor a respeito do comportamento estrutural dos efeitos do nivelamento nos tecidos ósseos e ligamentares da região mandibular, o objetivo desse artigo é modelar no software de CAD Rhinoceros 3D duas mandíbulas de padrão facial mesodivergente, uma com a curva de Spee nivelada e a outra com a curva natural. Os modelos gerados serão posteriormente utilizados em análise de elementos finitos para simular e comparar suas respostas mecânicas.

2. Metodologia

Inicialmente foi necessário definir algumas características dos modelos, como a presença de simetria e que, independente da curva, as mandíbulas tenham uma boa oclusão dental. Além disso, para posteriormente ser possível analisar o comportamento dos dentes anteriores (a partir da aplicação de força nos dentes posteriores) foi considerado o contato interdental. A Figura 2 apresenta as etapas implementadas.

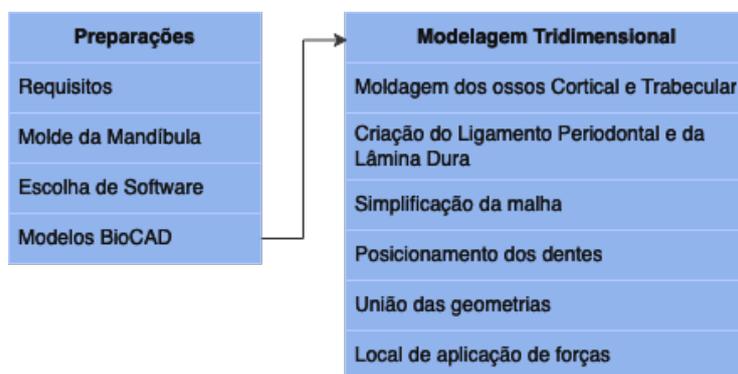


Figura 2. Esquema ilustrativo das etapas envolvidas na modelagem.

A geometria da mandíbula mesodivergente padrão foi obtida através de uma tomografia computadorizada dada pela pesquisadora responsável pelo caso em formato de arquivo STL (STereoLithography). Como o formato da mandíbula é complexo e orgânico, foi necessário empregar o protocolo BioCAD. Este protocolo, desenvolvido no laboratório de bioengenharia do Centro de Tecnologia de Informação Renato Archer, consiste numa série de procedimentos que constrói modelos a partir de marcos anatômicos (Miziara *et al.*, 2020) e demonstra-se mais eficiente comparado a utilização direta de arquivos STL em simulações (Perestrelo *et al.*, 2015). Neste contexto, a modelagem dos componentes anatômicos foi feita no software CAD Rhinoceros 3D 7 (Robert McNeel & Associates, Seattle, USA), por proporcionar a criação de geometrias não lineares chamadas NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) (Rhinoceros, 2023).

Para facilitar o processo, também foi obtido os modelos dos dentes e de um modelo de osso cortical e trabecular através de um banco de imagens do BioCAD, eles são editáveis e também feitas no Rhinoceros 3D. Para modelar o osso trabecular e cortical da mandíbula, inicialmente foi necessário posicionar o modelo BioCAD no modelo de referência em formato STL, conforme ilustrado na Figura 3a. Posteriormente, foram feitos ajustes na mandíbula do BioCAD para replicar as principais características do modelo de referência, incluindo o ângulo goníaco e suas dimensões. O processo utilizou principalmente o comando “*CageEdit*” que consistiu em utilizar control points (pontos que definem a forma de um objeto) para deformar o modelo. Deve se destacar que é possível deformar mais de um objeto ao mesmo tempo com essa ferramenta, logo, o osso trabecular foi modelado na mesma proporção que o osso cortical.

Para fins de comparação, foram utilizados planos de intersecção em ambas geometrias STL e BioCAD. Os comandos utilizados foram “*CutPlanes*” para os planos de corte, “*MeshIntersect*” e “*Intersect*” para a intersecção dos planos com o modelo STL e BioCAD respectivamente. Entretanto, para mudanças pontuais o método não demonstrou-se eficaz, sendo necessário recortar e reconstruir a região a partir das curvas de intersecção do local e criando as novas superfícies. A Figura 3b ilustra o comando “*CageEdit*” com os planos de intersecção, em que o modelo BioCAD é representado pelas cores verde e amarelo e o modelo STL pelas cores vermelho e azul.

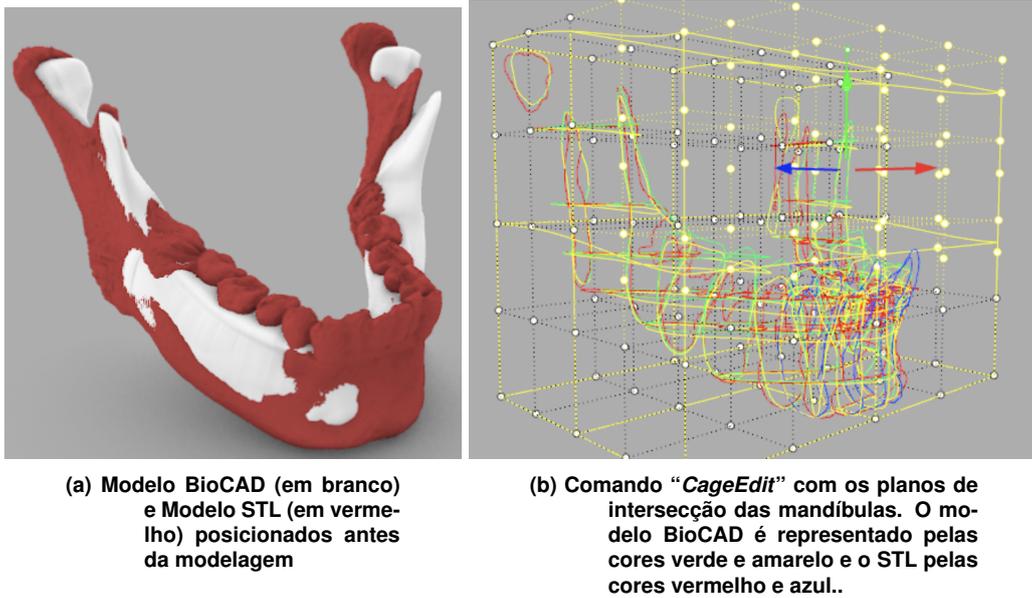


Figura 3. Modelagem dos Ossos Cortical e Trabecular.

Já a construção da lâmina dura (delimitação entre a camada de osso cortical e a camada de osso trabecular) e do ligamento periodontal ocorreram como uma expansão dos dentes. A lâmina dura foi construída com uma espessura adicional de $1.3mm$ (Figura 4a), enquanto o ligamento foi de $0.3mm$ (Figura 4b). Essas informações foram retiradas de acordo com o modelo BioCAD.

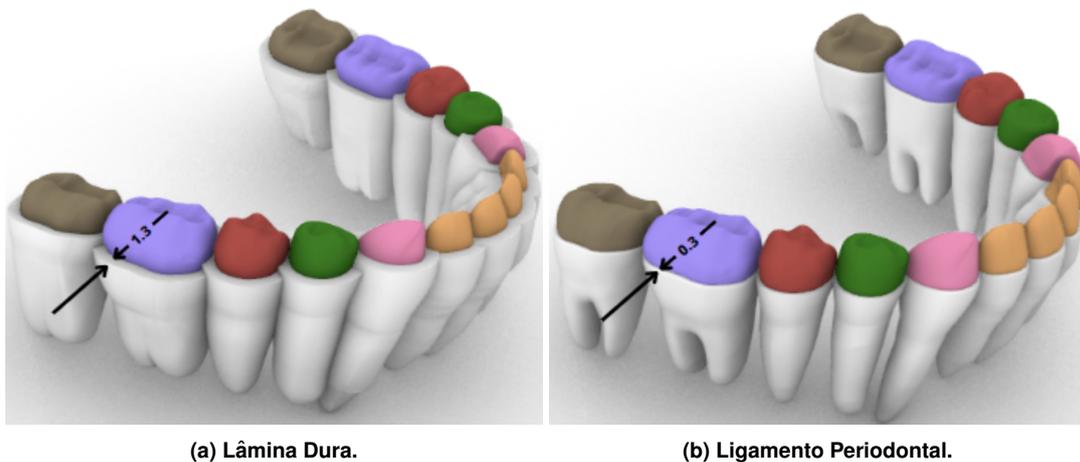


Figura 4. Modelagem da Lâmina Dura e do Ligamento Periodontal.

Após a finalização dos componentes foi verificado que os ossos, como o osso cortical na Figura 5a, se constituíam de muitas superfícies e que no fim dificultariam no processo de geração da malha de elementos finitos. A Figura 5b mostra o resultado da utilização dos comandos “*QuadRemesh*” e “*ToNURBS*” para refinar e reduzir esse problema.

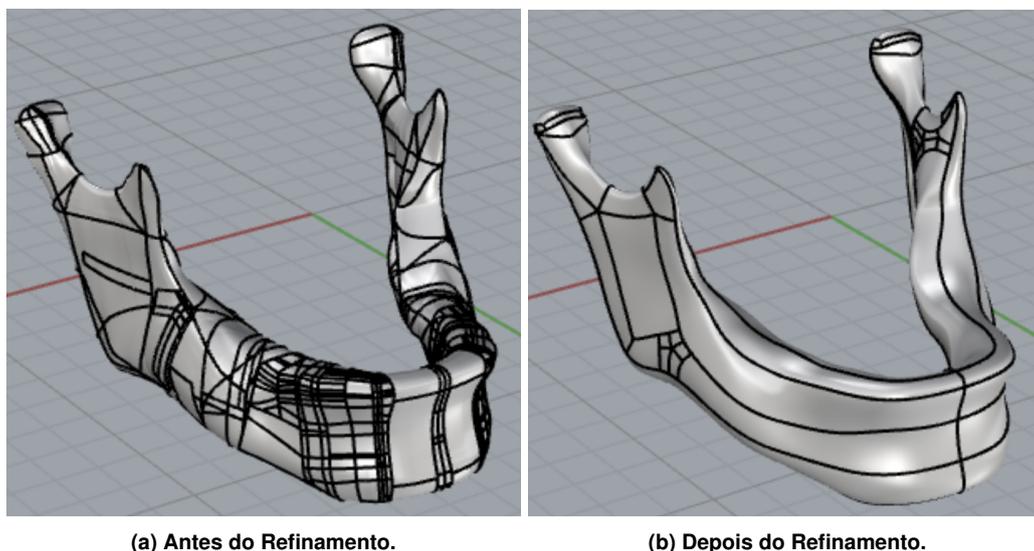


Figura 5. Superfícies do Osso Cortical antes e depois do refinamento.

Em seguida, com o auxílio da pesquisadora responsável, foram posicionados no plano da mandíbula, os dentes (com uma área de contato interdental de $\approx 0.39mm^2$), os ligamentos e a lâmina dura. Para determinar a altura desses componentes no tecido ósseo, foi estabelecido um plano auxiliar entre a cúspide mais distal dos dois últimos molares e a borda incisal dos incisivos centrais. Neste momento, a confecção entre a mandíbula com a curva de Spee nivelada e com a curva natural se diferenciam. Na primeira curva, a cúspide dos dentes intermediários (incisivo lateral, canino, primeiro pré molar, segundo pré molar e segundo molar) tangenciam o plano auxiliar, nivelando a curva. Já na segunda curva, os dados de altura (com referência de normalidade) dos intermediários se baseiam no artigo de Veli *et al.* (2015). Essa diferença pode ser observada na Figura 6, em que as Figuras 6a e 6b representam as curvas de Spee Nivelada e Natural respectivamente.

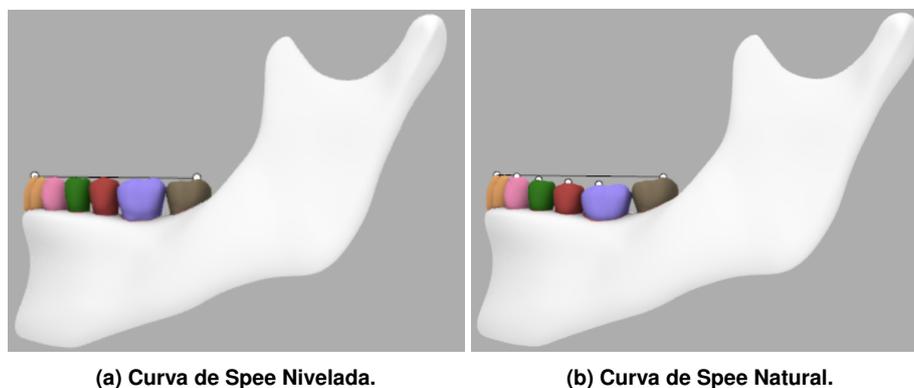


Figura 6. Representação das curvas de Spee Nivelada e Natural.

Com todos os componentes posicionados em cada mandíbula, foi necessário fazer ajustes e a alocação de cada elemento nos ossos cortical e trabecular. Para isso, foram feitos os seguintes procedimentos:

1. para ajustar a altura do ligamento periodontal ao osso cortical, foi feito a remoção do excesso de altura do ligamento a partir do osso. Para isso foi usado o comando “*BooleanIntersect*”;
2. para fazer a alocação da lâmina dura no osso trabecular (Figura 7a), dos ligamentos periodontais no osso cortical (Figuras 7b e 7c) e dos dentes nos ligamentos (Figuras 7c e 7d), foi utilizado o comando “*BooleanDifference*”.

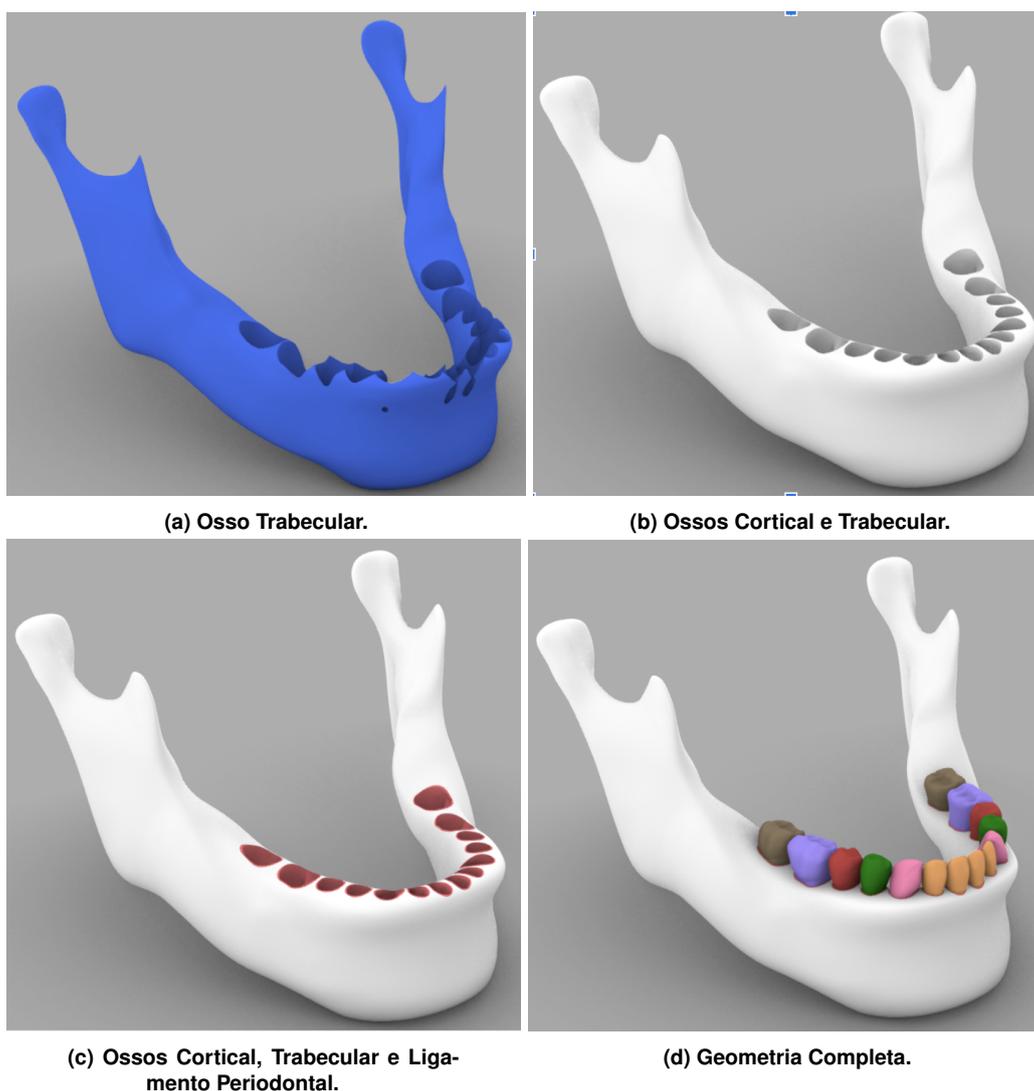


Figura 7. Estruturas da mandíbula mesodivergente com curva de Spee Nivelada.

Por fim, o local de aplicação da força para simular uma oclusão normal foi determinada pelo contato das cúspides palatinas dos dentes maxilares com os dentes da mandíbula. Assim, com base na Figura 8a de Bataglioni (2020) foi marcado no modelo dos dentes mandibulares as regiões de contato oclusal (Figura 8b) com uma área circular aproximada de $\approx 0.78mm^2$.

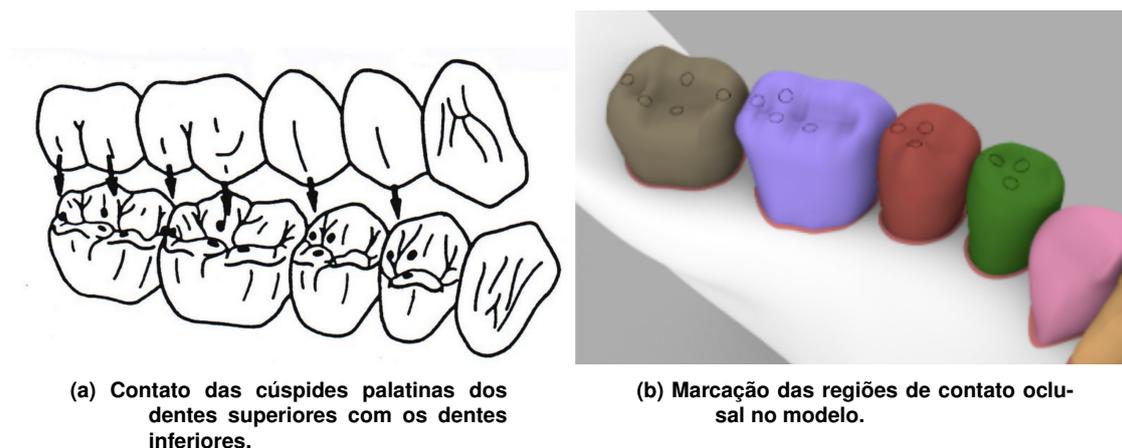


Figura 8. Área de contato oclusal.

3. Resultados

O objetivo do trabalho foi modelar duas mandíbulas mesodivergente, uma com curva de Spee nivelada e outra com curva de Spee natural. A modelagem foi feita no software Rhinoceros 3D tendo como base a malha STL da mandíbula enviada pelo responsável pelo caso e um modelo de mandíbula editável feito pelo protocolo BioCAD. A partir disso, a Figura 9a mostra o modelo STL (em vermelho) e o modelo BioCAD (em branco) posicionados, antes da aplicação da metodologia, e a Figura 9b mostra o resultado final. Destaca-se na Figura 9b a proximidade de ambas geometrias.

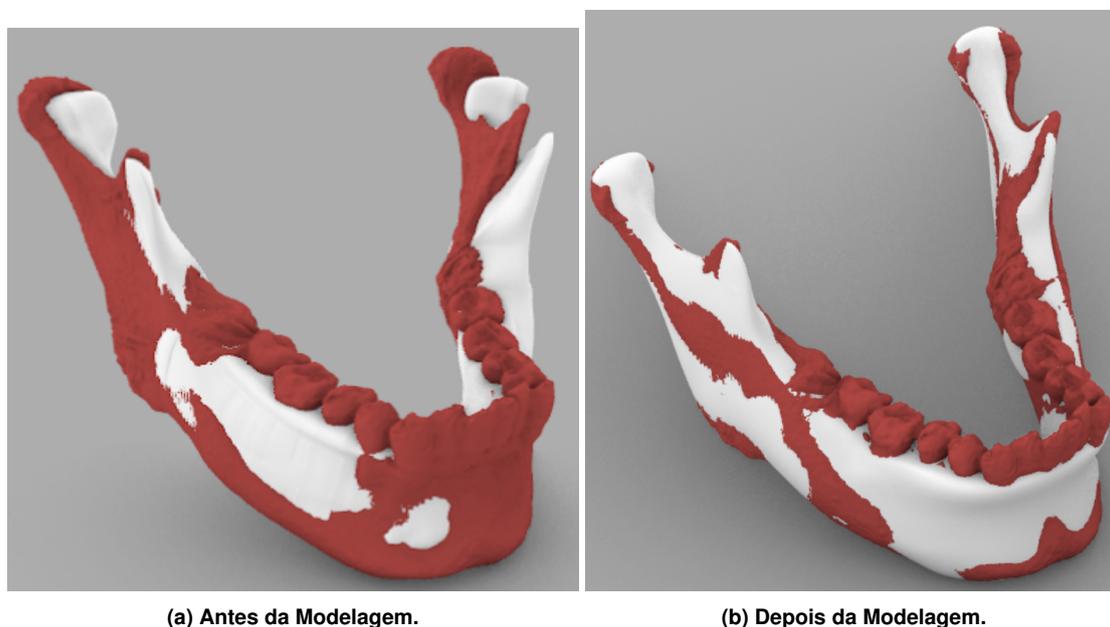


Figura 9. Comparação das mandíbulas do modelo BioCAD (em branco) com o modelo referenciado, STL (em vermelho) antes e depois da modelagem.

Já na Tabela 1, os resultados finais da modelagem de todos os componentes de ambas as mandíbulas são exibidos. Nas Figuras 10 e 11 foram deixados em evidência o osso trabecular, enquanto nas Figuras 12 e 13 os modelos mandibulares completos foram apresentados. Os posicionamentos dos dentes foram feitos com um plano auxiliar que tangencia a cúspide mais distal dos dois últimos molares e a borda incisal do incisivos centrais. Dessa forma, as representações das mandíbulas com curva de Spee nivelada são mostradas nas Figuras 10 e 12, enquanto aquelas com curva de Spee natural são mostradas nas Figuras 11 e 13. Pode-se observar que, visualmente, a maior mudança se destacou na região do osso trabecular (Figuras 10 e 11), além do primeiro molar mais elevado nas representações com curva nivelada (Figuras 10 e 12).

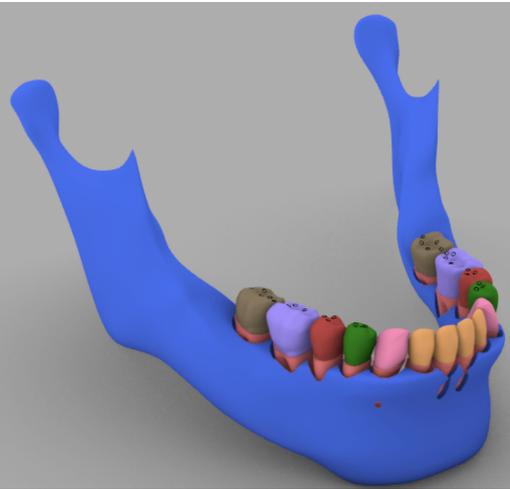
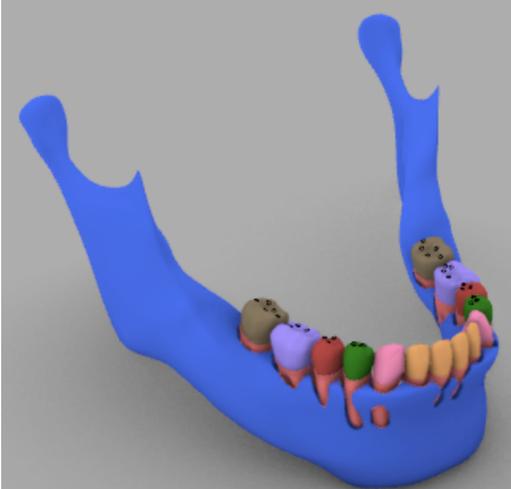
	Curva de Spee Nivelada	Curva de Spee Natural
Osso Trabecular	 <p>Figura 10. Osso Trabecular Nivelado</p>	 <p>Figura 11. Osso Trabecular Natural</p>
Osso Cortical	 <p>Figura 12. Geometria Completa com Curva de Spee Nivelada</p>	 <p>Figura 13. Geometria Completa com Curva de Spee Natural</p>

Tabela 1. Resultados Finais da Modelagem.

Como já citado anteriormente, após essa modelagem será feita a análise em elementos finitos em ambos os segmentos. Será avaliado e comparado o deslocamento e a distribuição de tensão nos tecidos ósseos e ligamentares e, enfim, será tirado conclusões sobre os efeitos do nivelamento da curva Spee.

4. Conclusão

A utilização da metodologia no software Rhinoceros 3D proporcionou a modelagem de duas mandíbulas de padrão facial mesodivergente com diferentes curvas de Spee e que estão prontas para uso em simulações de elementos finitos. Logo conclui-se que a construção desses modelos permite a possibilidade de que análises computacionais sejam feitas de maneira padronizada (sem variabilidade orgânica) e que consigam simular o comportamento físico da estrutura. Além disso, a relevância da interdisciplinaridade é destacada, nesse caso da engenharia e da odontologia, para a construção de representações válidas.

5. Agradecimentos

Agradeço ao professor orientador Pedro Y. Noritomi pela oportunidade e pelos ensinamentos. Aos coorientadores Marcília V. Guimarães e Leonardo M. Machado pelos treinamentos, direcionamentos e aconselhamento durante a pesquisa. Agradeço também à equipe LAPRINT por proporcionar um ambiente de trabalho agradável e produtivo e a todos os envolvidos na pesquisa, pelo apoio contínuo e pela contribuição do meu desenvolvimento pessoal e profissional. Por fim, também agradeço ao CNPQ e ao PIBIC pela bolsa e o fomento à pesquisa.

6. Referências

- Andrews, L. (1972). The six keys to normal occlusion. *American Journal of Orthodontics*, 62(3):296–309.
- Bataglion, C.. 2020. Fundamentos e conceitos básicos da oclusão dental. Faculdade de odontologia da universidade de São Paulo (USP), Ribeirão Preto-SP.
- Hitchcock, H. (1983). The curve of spee in stone age man. *American Journal of Orthodontics*, 84(3):248–253.
- Jardini, A., Larosa, M., Filho, R., Zavaglia, C., Bernardes, L., Lambert, C., Calderoni, D., and Kharmandayan, P. (2014). Cranial reconstruction: 3d biomodel and custombuilt implant created using additive manufacturing. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 42(8):1877–1884.
- Miziara, T., Machado, L., and Noritomi, P. Estudo e desenvolvimento de modelos biocad aplicando elementos finitos. *In: Jornada de Iniciação Científica do CTI Renato Archer (JICC)*, 21., 2020, Campinas-SP. Anais Eletrônicos [...]. Campinas-SP, 2020. Disponível em [https://www1.cti.gov.br/sites/default/files/jicc-2020 paper 20.pdf](https://www1.cti.gov.br/sites/default/files/jicc-2020%20paper%20.pdf). Acessado em 10 ago 2023.
- Papadopoulou, K., Hasan, I., Keilig, L., Reimann, S., Eliades, T., Jäger, A., Deschner, J., and Bourauel, C. (2013). Biomechanical time dependency of the periodontal ligament: a combined experimental and numerical approach. *European Journal of Orthodontics*, 35(6):811–818.

- Perestrelo, P., Noritomi, P., Camilo, A., Nunes, A., and Silva, J. Comparação de técnicas de modelagem: Biocad versus stl. *In: Encontro Nacional de Engenharia Biomecânica (ENEBI), 2015, Uberlândia-MG. Anais Eletrônicos [...]. Uberlândia-MG, 2015. Disponível em <https://abcm.org.br/anais/enebi/2015/PDFS/EEB-2015-0109.PDF>. Acessado em 10 ago 2023.*
- Praeter, J., Dermaut, L., Martens, G., and Jagtman, A. (2002). Long-term stability of the leveling of the curve of spee. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 121(3):266–272.
- Preston, C. B., Maggard, M. B., Lampasso, J., and Chalabi, O. (2008). Long-term effectiveness of the continuous and the sectional archwire techniques in leveling the curve of spee. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 133(4):550–555.
- Qahtani, W. and El-Anwar, M. (2018). Advanced computational methods in biomechanics. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 6(4):742–746.
- Biocad—biomedical modeling inc. SolidWorks Corporation, 2023. Disponível em <https://www.solidworks.com/partner-product/biocad>. Online; Acessado em 2023/08/08.
- Trivedi, S. (2014). Finite element analysis: A boon to dentistry. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 4(3):200–203.
- Veli, I., Ozturk, M., and Uysalc, T. (2015). Curve of spee and its relationship to vertical eruption of teeth among different malocclusion groups. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 147(3):305–312.
- Vázquez, R., Sosa, G., Rivera, R., Ángeles, B., Miranda, O., Feijoo, J., and Calderón, G. (2020). High-biofidelity biomodel generated from three-dimensional imaging (cone-beam computed tomography): A methodological proposal. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2020(1):1-14. doi:10.1155/2020/4292501
- What are NURBS?. Rhinoceros 3D, 2023. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/nurbs>. Acesso em: 10/08/2023.