

CONSTRUÇÃO DE MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA AVALIAÇÃO DO FECHAMENTO DE ESPAÇO DENTAL COM ALINHADORES

Ulrich Gautheron Emygdio Pereira, gautheron.emygdio@unesp.br¹

Raíssa Marielly Parente Bernardino, raissa.marielly@unesp.br²

Bruno Agostinho Hernandez, bruno.agostinho@unesp.br¹

Edson Antonio Capello Sousa, edson.capello@unesp.br¹

Nicole Cindy Fontinele Miranda, nicolecindy@usp.br³

Ivan Onone Gialain, ivan.gialain@cogna.com.br

Josete Barbosa Cruz Meira, jo@usp.br³

Luiz Gonzaga Gandini Junior, luiz.gandini@unesp.br²

¹Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 - Vargem Limpa, Bauru - SP, 17033-360

²Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Odontologia (FOAr), R. Humaitá, 1680 – Araraquara - SP, 14801-385

³Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia (FOUSP), Av. Prof. Lineu Prestes, 2227 - Cidade Universitária, São Paulo - SP, 05508-000

⁴ Universidade de Cuiabá, Faculdade de Odontologia, Av. Manoel José de Arruda, nº 3100 - Jardim Europa, Cuiabá - MT, 78065-900

Resumo. A popularização dos alinhadores transparentes como alternativa estética e confortável aos aparelhos ortodônticos fixos impulsionou pesquisas sobre sua biomecânica. Objetiva-se então avaliar o comportamento biomecânico destes dispositivos, especialmente a influência dos formatos dos attachments (retangular, horizontal e quadrado). Para este trabalho, mostra-se o desenvolvimento inicial de um Modelo em Elementos Finitos (MEF) de um caso de biprotusão tratados com extrações de pré-molares para avaliar o fechamento de espaços dentários. Desenvolveu-se um modelo tridimensional com três formatos de attachments (retangular, horizontal e quadrado), a fim de analisar, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), deslocamentos dentários, distribuição de forças e tensões no ligamento periodontal. Resultados preliminares sugerem influência significativa do formato dos attachments na previsibilidade dos movimentos. Este estudo contribui para otimização dos protocolos clínicos com alinhadores transparentes.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos. Alinhadores Transparentes. Attachments. Bioengenharia

Abstract. The popularization of clear aligners as an aesthetic and comfortable alternative to fixed orthodontic appliances has stimulated research into their biomechanics. This study aims to evaluate the biomechanical behavior of these devices, particularly the influence of attachment shapes (rectangular, horizontal, and square). This paper presents the initial development of a Finite Element Model (FEM) simulating a biprotrusion case treated with premolar extractions to assess dental space closure. A three-dimensional model was developed with three attachment shapes (rectangular, horizontal, and square) to analyze, using the Finite Element Method (FEM), tooth displacements, force distribution, and stress in the periodontal ligament. Preliminary results suggest that attachment shape significantly influences the predictability of tooth movements. This study contributes to the optimization of clinical protocols involving clear aligners.

Keywords: Finite Element Method. Clear Aligners. Attachments. Bioengineering.

1. INTRODUÇÃO

A procura por tratamento odontológico em adultos está levando a uma crescente demanda por aparelhos dentários que sejam esteticamente agradáveis e confortáveis, em oposição aos tradicionais aparelhos fixos de metal ou cerâmica transparente (Rossini et al., 2015). Desde a aprovação da Align Technology pelo FDA em 1998, os alinhadores

transparentes, conhecidos comercialmente como Invisalign, surgiram como uma alternativa no campo da ortodontia. O tratamento com esses alinhadores requer a participação ativa dos pacientes, que devem trocar sequencialmente as placas poliméricas fabricadas a partir de modelos odontológicos. Estes alinhadores são introduzidos de forma incompatível com as posições dentais e utilizados por duas semanas que geram um sistema de carga e movem os dentes à posição correta (Barone et al., 2017).

Em relação aos aparelhos fixos, algumas vantagens dos alinhadores são: redução dos níveis dolorosos, melhor higiene (El-Bialy, 2020), conforto do paciente, estética, saúde periodontal, tempo de tratamento e tempo clínico (Diddige et al., 2020; Galan-Lopez, Barcia-Gonzalez e Plasencia, 2019). Possuem como desvantagens a cooperação do paciente, limitação de casos de extração (Bollen et al., 2003), distúrbios na fala e aumento do fluxo salivar (Nedwed e Miethke, 2005). Com o aprimoramento das técnicas e o reconhecimento gradual das propriedades biomecânicas dos materiais dos alinhadores, esses dispositivos não se limitaram mais a corrigir pequenos desalinhamentos dentários, mas passaram a tratar também más oclusões complexas (Baldwin et al., 2008).

Na ortodontia moderna, a necessidade de extrações é bastante comum, com cerca de 30% dos pacientes precisando de extração de pré-molares para corrigir a má oclusão (Jena et al., 2020). Dentre elas, se destaca a biprotrusão dentária, condição comum entre populações afro-brasileiras (De Freitas et al., 2008), afro-americanas e asiáticas, como também pode se apresentar em outros grupos étnicos. Geralmente, estes pacientes buscam tratamento ortodôntico para diminuir a convexidade facial (Bills, Handelman e Begole, 2005a), e um dos tratamentos consiste na exodontia dos quatro primeiros pré-molares (Bills, Handelman e Begole, 2005b; Ogundipe e Otuyemi, 2017).

Para permitir que esses pacientes biprotrusos se beneficiem do tratamento com alinhadores, os ortodontistas fazem planejamentos para compensar a limitação do controle dos movimentos proporcionado pelos alinhadores. A limitação está relacionada às propriedades do material polimérico elástico, que não consegue simultaneamente oferecer alta elasticidade para produzir uma força ortodôntica adequada e força suficiente para garantir o movimento completo dos dentes para a posição desejada (Zhu et al., 2023).

Nesse contexto, uma ferramenta importante na pesquisa ortodôntica tem sido o Método dos Elementos Finitos (MEF), que permite avaliar tensões no ligamento periodontal e no osso alveolar, direção dos deslocamentos dentários, áreas de reabsorção radicular e destruição de tensões nos arcos. O MEF é mais preciso, não invasivo, permite controle de variáveis e fornece dados quantitativos sobre estruturas internas (Knop et al., 2015). De forma confiável, é possível analisar os efeitos biomecânicos da movimentação ortodôntica (Cattaneo, Dalstra e Melsen, 2005).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo geral investigar a influência de diferentes formatos de attachments ortodônticos sobre a movimentação dentária, a distribuição de forças e as tensões no ligamento periodontal, utilizando simulações computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos. Busca-se, assim, contribuir para o aprimoramento dos protocolos clínicos envolvendo o uso de alinhadores transparentes.

Neste trabalho é apresentado o progresso atual do projeto, que ainda está em desenvolvimento. São descritas as etapas já realizadas, incluindo a construção do modelo tridimensional e configuração inicial das simulações por Elementos Finitos. Embora os resultados ainda sejam parciais, eles já apontam tendências relevantes quanto às tensões exercidas pelo alinhador sobre os dentes em um caso de biprotrusão.

2. METODOLOGIA

2.1 Modelagem Inicial

Um modelo tridimensional representando a biprotrusão foi gerado a partir de imagens de tomografia computadorizada e fornecido por colaboradores da FOUSP (Fig. 1). A análise estrutural subsequente foi realizada no Ansys Workbench (v22R2, Ansys Inc., Estados Unidos).

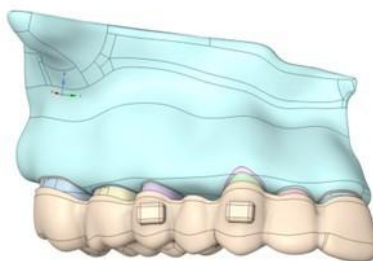


Figura 1. Modelo tridimensional com biprotrusão (Autoria Própria)

2.2 Primeiros Testes

Simulações iniciais foram conduzidas utilizando apenas um dente e materiais genéricos, para verificação da integridade da malha e da geometria, como apresentado na Fig. 2.

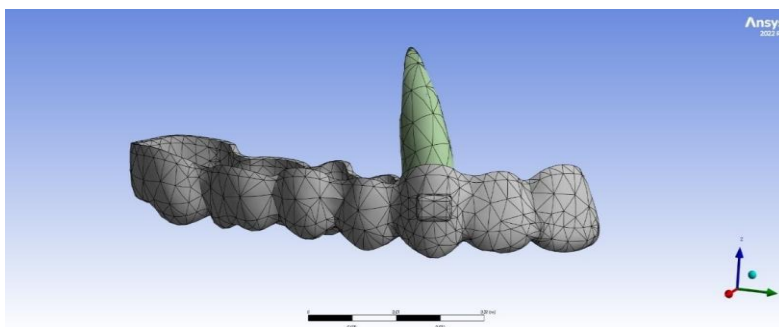


Figura 2. Simulação inicial (Autoria Própria)

2.3 Correção de geometria

Problemas de modelagem foram identificados no alinhador e no dente 17. A ferramenta “shrinkwrap”, do SpaceClaim (v22R2, Ansys Inc., Estados Unidos), foi utilizada para correção (Fig. 3).

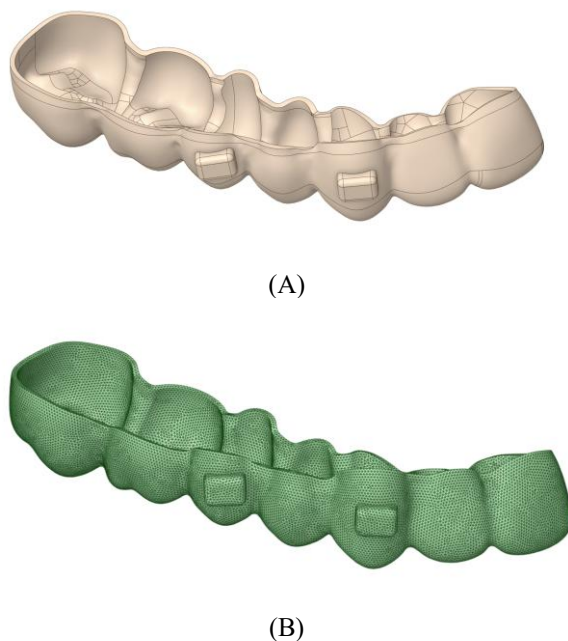


Figura 3. (A) Geometria não corrigida. (B) Geometria corrigida (Autoria Própria)

2.4 Atribuição de propriedades mecânicas e condições de contorno

Após garantir a funcionalidade do modelo, foram atribuídos os materiais para cada geometria. As propriedades utilizadas estão apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais (Bernadini, 2025)

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
Dente	19,6	0,30
Ligamento Periodontal (PDL)	0,00067	0,45
Alinhador	0,528	0,36
Attachment	12,5	0,36
Osso	13,7	0,30

Para as condições de contorno do modelo, seguiu-se da seguinte forma:

- Todas as relações de contato foram definidas como “bonded”;
- Nos nós da parte superior da maxila foi aplicado um “fixed support” (Fig. 4)
- Foi realizado um corte no alinhador, na região da biprotusão, onde foram aplicados dois deslocamentos, um de -0,15mm e outro de 0,10mm, ambos em Y (Fig. 5).

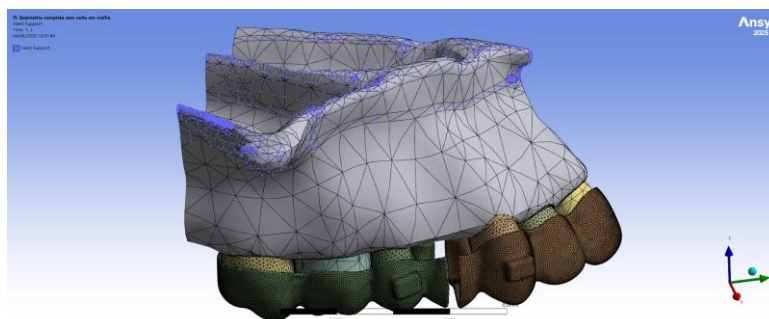


Figura 4. Fixação dos nós da maxila

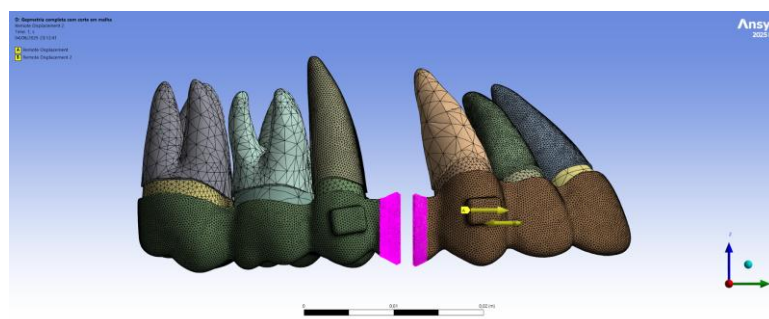


Figura 5. Deslocamento aplicado nos nós do alinhador

3. RESULTADOS

Com o modelo verificado e com os materiais atribuídos, foi possível simular as condições desejadas, como apresentados na Fig. 6, indicando um sentido de rotação dos dentes.

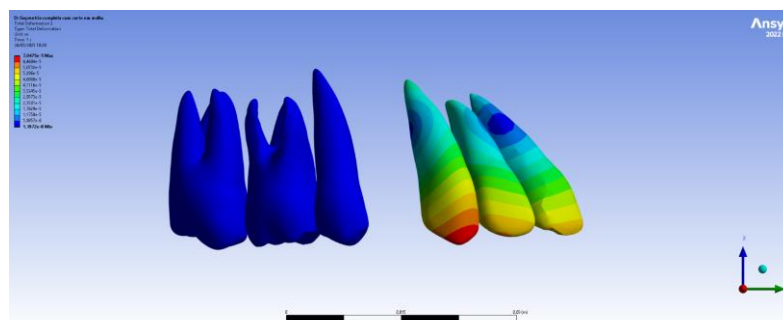


Figura 6. Deslocamento total dos dentes (Autoria Própria)

As simulações apresentaram deslocamentos compatíveis com os padrões esperados na literatura (Knop et al., 2015). O único problema apresentado foram os dentes do lado esquerdo, que apresentaram um deslocamento muito menor do que o esperado.

4. CONCLUSÕES

A metodologia empregada permitiu a obtenção de resultados preliminares consistentes, indicando que o modelo é adequado para as análises propostas. Entretanto, uma nova revisão do modelo será conduzida, a fim de aproximar mais as respostas do modelo com os resultados físicos esperados.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

6. REFERÊNCIAS

- BALDWIN, D. K. et al. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 3: Premolar extraction patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, v. 133, n. 6, p. 837–845, jun. 2008.
- BARONE, S. et al. Computational design and engineering of polymeric orthodontic aligners. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, v. 33, n. 8, 1 ago. 2017.
- BERNARDINO, R. M. P.; *Tratamento da biprotrusão dentária, com extração de primeiros pré-molares maxilares utilizando alinhadores transparentes: simulação por análise de elementos finitos*. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Araraquara, 2025.
- BILLS, D. A.; HANDELMAN, C. S.; BEGOLE, E. A. Bimaxillary Dentoalveolar Protrusion: Traits and Orthodontic Correction. *Angle Orthodontist*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://meridian.allenpress.com/angle-orthodontist/article-pdf/75/3/333/1379095/0003-3219>.
- BOLLEN, A. M. et al. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, v. 124, n. 5, p. 496–501, 2003.
- CATTANEO, P. M.; DALSTRA, M.; MELSEN, B. The finite element method: A tool to study orthodontic tooth movement. *Journal of Dental Research*, v. 84, n. 5, p. 428–433, maio 2005.
- DE FREITAS, L. M. A. et al. Padrão esquelético, dentário e tegumentar de jovens brasileiros melanodermas com "oclusão normal". *Revista Uninga*, v. 17, n. 1, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.46311/ru.v17i1>. Acesso em: 29 mar. 2025.
- DIDDIGE, R. et al. Comparison of pain levels in patients treated with 3 different orthodontic appliances - a randomized trial. *Medicine and Pharmacy Reports*, v. 93, n. 1, p. 81–88, 2020.
- EL-BIALY, T. The Use of High Frequency Vibration and Clear Aligners in Management of an Adult Patient with Class III Skeletal Malocclusion with Open Bite and Severe Bimaxillary Protrusion: Case Report. *Dentistry Journal*, v. 8, n. 3, 14 jul. 2020.
- GALAN-LOPEZ, L.; BARCIA-GONZALEZ, J.; PLASENCIA, E. A systematic review of the accuracy and efficiency of dental movements with invisalign®. *Korean Journal of Orthodontics*, v. 49, n. 3, p. 140–149, 1 maio 2019.
- JENA, A. K. et al. Temporary deterioration of oral health-related quality of life (OHRQoL) in nonextraction and extraction modalities of comprehensive orthodontic treatment in adolescents. *Angle Orthodontist*, v. 90, n. 4, p. 578–586, 2020.
- KNOP, L. et al. Scientific use of the finite element method in orthodontics. *Dental Press Journal of Orthodontics*, v. 20, n. 2, p. 119–125, 2015.
- NEDWED, V.; MIETHKE, R. R. Motivation, Akzeptanz und Probleme von Invisalign™-Patienten. *Journal of Orofacial Orthopedics*, v. 66, n. 2, p. 162–173, mar. 2005.
- OGUNDIPE, O. K.; OTUYEMI, O. D. Surgical and orthodontic treatment methods in patients with bimaxillary protrusion - A systematic review. *Journal of the West African College of Surgeons*, v. 7, n. 2, p. 31–46, 2017. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6016752/>. Acesso em: 29 mar. 2025.

- ROSSINI, G. et al. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: A systematic review. Angle Orthodontist. Allen Press Inc., 1 set. 2015.
- ZHU, G. YIN et al. Finite element analysis of the biomechanical effect of clear aligners in extraction space closure under different anchorage controls. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, v. 163, n. 5, p. 628–644.e11, 1 maio 2023.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.