

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ODONTOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA

Aline Rezende Zaiter

**Estudo da distribuição de tensões e do deslocamento na maxila e nos dentes  
resultantes do uso do expansor maxilar diferencial  
através do método de elementos finitos**

Juiz de Fora  
2024

**Aline Rezende Zaiter**

**Estudo da distribuição de tensões e do deslocamento na maxila e nos dentes  
resultantes do uso do expansor maxilar diferencial  
através do método de elementos finitos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Odontologia, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra. Área de concentração em Clínica Odontológica.

Orientador: Prof. Dr. Robert Willer Farinazzo Vitral

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Zaiter, Aline Rezende.

Estudo da distribuição de tensões e do deslocamento na maxila e nos dentes resultantes do uso do expansor maxilar diferencial através do método de elementos finitos / Aline Rezende Zaiter. -- 2024.

67 f.

Orientador: Robert Willer Farinazzo Vitral

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Odontologia. Programa de Pós-Graduação em Clínica Odontológica, 2024.

1. Expansão rápida da maxila. 2. Expansor maxilar diferencial. 3. Método de elementos finitos. I. Vitral, Robert Willer Farinazzo, orient. II. Título.

**Aline Rezende Zaiter**

**Estudo da distribuição de tensões e do deslocamento na maxila e nos dentes resultantes do uso do expansor maxilar diferencial através do método de elementos finitos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Odontologia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Odontologia. Área de concentração: Clínica Odontológica.

Aprovada em 27 de agosto de 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Robert Willer Farinazzo Vitral - Orientador e Presidente da Banca**

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

**Prof. Dr. Marcio José da Silva Campos - Membro titular interno**

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Daniela Gamba Garib Carreira - Membro titular externo**

Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia de Bauru - FOB-USP

Juiz de Fora, 08/08/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Robert Willer Farinazzo Vitral, Professor(a)**, em 27/08/2024, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Jose da Silva Campos, Professor(a)**, em 27/08/2024, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Daniela Gamba Garib Carreira, Usuário Externo**, em 27/08/2024, às 17:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1910144** e o código CRC **8F80B12E**.

---

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação ao meu marido, Rodrigo, e aos meus pais, Alessandra e Miguel que se fizeram presentes e motivadores nesta etapa da minha vida. Amo vocês!

## AGRADECIMENTOS

À **Deus**, por toda perseverança, sustentação e força, não me deixando desistir dos sonhos.

Ao meu marido, **Rodrigo**, pelo apoio incondicional, compreendendo minhas ausências no dia-a-dia.

Aos meus pais, **Miguel e Alessandra**, pelos exemplos de perseverança e determinação que são em minha vida.

Agradeço ao orientador, **Prof. Robert**, pela oportunidade, confiança e paciência, contribuindo com o seu conhecimento na pesquisa. Ao doutorando **Gustavo** pelas correções e sugestões.

Aos **profissionais do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI – Campinas, SP)** por abraçarem a proposta da pesquisa e realizarem toda a etapa do método de elementos finitos.

Aos estimados **Professores componentes da banca examinadora**, pela disponibilidade e gentileza em aceitar e colaborar com esta pesquisa.

Às **mestrandas e doutorandas** do núcleo da Ortodontia que tive a oportunidade de conhecer e que tanto me incentivaram.

Aos **alunos da graduação** (do estágio docente) que, com suas perguntas e pedidos de ajuda, foram fontes de motivação nesta caminhada.

A todos que, com uma simples palavra de incentivo, um abraço ou uma oração, contribuíram para me fortalecer ao longo desta jornada.

Minha sincera gratidão.

## RESUMO

**Introdução:** Este estudo teve o objetivo de analisar os padrões de distribuição de tensões na maxila e no ligamento periodontal, bem como o deslocamento dentário a partir de simulações de aberturas do expansor maxilar diferencial (EMD) com o método de elementos finitos (MEF). **Métodos:** Parte da maxila com os dentes de um hemiarco superior, a sutura palatina mediana (SPM) e o aparelho EMD foram modelados. Três modelos foram simulados com diferentes ativações nos parafusos anterior e posterior. No modelo M1, uma ativação de 0,25mm foi simulada no parafuso anterior e no parafuso posterior. Em M2, foi simulada uma abertura de 0,5mm no parafuso anterior e 0,25mm no posterior. E no modelo M3, uma ativação de 0,25mm foi simulada apenas no parafuso anterior. Em cada modelo simulado, as distribuições de tensões na maxila, na SPM, nos ligamentos periodontais e o deslocamento dentário foram registrados. **Resultados:** Todos os modelos simulados apresentaram deslocamento dentário com inclinação vestibular de coroa, concomitante a intrusão da face vestibular e extrusão da face palatina. A abertura da SPM apresentou vértice em posição anterior e posterior em todos os modelos, bem como a área de concentração tensão na maxila ficou localizada em região média de palato com subsequente dissipação em direções anterior e posterior. O modelo M2 obteve maiores deslocamentos dentários e distribuições de tensões na estrutura maxilar e no ligamento periodontal. **Conclusão:** As ativações dos parafusos anterior e/ou posterior do EMD interferiram no deslocamento dentário, no padrão de distribuição e na intensidade de tensões na maxila, SPM e ligamentos periodontais. Ao ativar ambos os parafusos com sobrecarga anterior, houve maior transferência de carga mecânica para as estruturas anatômicas.

**Palavras-Chave:** Expansão maxilar; Expansor maxilar diferencial; Análise de elementos finitos.

## ABSTRACT

**Introduction:** The aim of this study was to determine the stress distribution patterns in the maxillary structure and periodontal ligament and tooth displacement by simulating screw activations of the maxillary expander with differential opening (EDO) using the finite element method (FEM). **Methods:** Part of the maxilla with the teeth of an upper hemi-arch, the midpalatal suture (MPS) and the EDO appliance were modeled. Three models were simulated with different activations on the anterior and posterior screws. In model M1, a 0.25mm activation was simulated on the anterior screw and the posterior screw. In M2, an opening of 0.5mm in the anterior region and 0.25mm in the posterior region was simulated. And in the M3 model, a 0.25mm activation was simulated only in the anterior screw. The stress distributions in the maxilla were registered in each model. **Results:** All the simulations showed tooth displacement with buccal inclination of the crown, concomitant with intrusion of the buccal surface and extrusion of the palatal surface. The MPS opening had an anterior and posterior vertex in all models, and the area of stress concentration in the maxilla was located in the mid-palate region with subsequent dissipation in an anterior direction and towards the pterygoid process. The M2 model had greater tooth displacements and stress distributions in the maxillary structure and periodontal ligament. **Conclusion:** The activation of the anterior and/or posterior screws of the EDO interfered with the displacement, stress distribution pattern and stress intensity in both the maxilla and the periodontal ligaments. When activating both screws with anterior overload, there was a greater mechanical effect of the device on the anatomical structures.

**Keywords:** Maxillary expansion; Differential opening expander; Finite element analysis

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|           |                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1  | Desenho esquemático do expansor maxilar diferencial.....                                                                                                                                                                               | 17 |
| Figura 2  | (A) EMD com ativações semelhantes nos parafusos anterior e posterior<br>(B) EMD com maior quantidade de ativação no parafuso anterior.....                                                                                             | 17 |
| Figura 3  | (A) Modelo da maxila e componentes anatômicos: coroa dentária (cor branca), osso cortical (cor rosa), osso trabecular (cor vermelha). (B) Ligamento periodontal (cor vermelha).....                                                    | 22 |
| Figura 4  | Componentes constituintes do dispositivo EMD.....                                                                                                                                                                                      | 23 |
| Figura 5  | Dispositivo EMD posicionado no palato em vistas axial (A) e sagital (B).....                                                                                                                                                           | 23 |
| Figura 6  | Vistas axial (A) e sagital (B) do dispositivo EMD (cor cinza) sobreposto ao dispositivo Hyrax (cor verde).....                                                                                                                         | 24 |
| Figura 7  | (A) Modelo em elementos finitos, composto por elementos tetraédricos. (B) Região de refinamento da malha, evidenciando a diferença de tamanhos de elementos. (C) Elementos em barra 1D, usados para representar a SPM (cor verde)..... | 25 |
| Figura 8  | Deslocamento (em milímetros) da maxila em A, plano coronal, e em B, plano axial.....                                                                                                                                                   | 28 |
| Figura 9  | Tensão principal máxima, em megapascal, distribuída ao longo da maxila de cada modelo, por vistas sagital (A), axial (B) e coronal (C)..                                                                                               | 30 |
| Figura 10 | Tensão de tração, representada por valores positivos na escala de cores, e de compressão por valores negativos.....                                                                                                                    | 31 |
| Figura 11 | Vista axial do deslocamento dentário total (em milímetros) dos modelos simulados.....                                                                                                                                                  | 32 |
| Figura 12 | Delocamento dentário (em milímetros) no sentido de intrusão visto por vestibular (A) e de extrusão visto por palatina (B).....                                                                                                         | 33 |
| Figura 13 | Delocamento dentário horizontal (em milímetros) por vistas vestibular (A) e palatina (B).....                                                                                                                                          | 34 |
| Figura 14 | Distribuição de tensão de tração (em Megapascal) no ligamento periodontal por vistas vestibular (A) e palatina (B).....                                                                                                                | 36 |
| Figura 15 | Distribuição de tensão de compressão (em mega Pascal) no ligamento periodontal por vistas vestibular (A) e palatina (B).....                                                                                                           | 36 |

## LISTA DE TABELAS

|          |                                                                               |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 | Quantidade de elementos e nós da malha.....                                   | 25 |
| Figura 2 | Propriedades mecânicas atribuídas às estruturas do modelo<br>geométrico.....  | 26 |
| Figura 3 | Modelos de elementos finitos em relação à variação de abertura do<br>EMD..... | 26 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|     |                                    |
|-----|------------------------------------|
| CTI | Centro de Tecnologia da Informação |
| EMD | Expansor Maxilar Diferencial       |
| ERM | Expansão Rápida da Maxila          |
| MEF | Método de Elementos Finitos        |
| mm  | Milímetros                         |
| MPa | MegaPascal                         |
| SPM | Sutura Palatina Mediana            |

## SUMÁRIO

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                          | <b>11</b> |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                               | <b>13</b> |
| <b>3</b> | <b>OBJETIVOS.....</b>                                           | <b>21</b> |
| 3.1      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                      | 21        |
| <b>4</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                  | <b>22</b> |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS.....</b>                                          | <b>28</b> |
| 5.1      | DESLOCAMENTO TRANSVERSAL DA MAXILA.....                         | 28        |
| 5.2      | TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA NA MAXILA.....                          | 29        |
| 5.3      | TENSÃO NA SUTURA PALATINA MEDIANA.....                          | 30        |
| 5.4      | DESLOCAMENTO DENTÁRIO.....                                      | 31        |
| 5.4.1    | Deslocamento Total.....                                         | 31        |
| 5.4.2    | Deslocamento Vertical.....                                      | 33        |
| 5.4.3    | Deslocamento Horizontal.....                                    | 34        |
| 5.5      | TENSÃO DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO DO LIGAMENTO<br>PERIODONTAL ..... | 35        |
| <b>6</b> | <b>DISCUSSÃO.....</b>                                           | <b>37</b> |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                           | <b>42</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                         | <b>43</b> |
|          | <b>ANEXO A – Submissão do artigo.....</b>                       | <b>48</b> |
|          | <b>ANEXO B – Artigo em Português.....</b>                       | <b>49</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A atresia maxilar é uma alteração esquelética comum na infância (CHACONAS e CAPUTO, 1982; LAGRAVERE; MAJOR; FLORES-MIR, 2005; MASSARO et al., 2021a), associada à mordida cruzada posterior, cuja má oclusão requer intervenção assim que diagnosticada (SILVA FILHO, 1991; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013; GOPALAKRISHNAN e SRIDHAR, 2017).

A expansão rápida da maxila (ERM) é a intervenção ortopédica que promove o aumento da largura transversal da maxila (ANGELL, 1860; SILVA FILHO, 1991; GARIB et al., 2005; MORDENTE et al., 2016; FERNANDES et al., 2019; ALVES et al., 2020; MASSARO et al., 2021b). Este procedimento é considerado seguro e confiável (LIU; XU; ZOU, 2015), com seus efeitos dento-esqueléticos muito bem documentados na literatura ortodôntica (GARIB et al., 2005; FIGUEIREDO et al., 2014; LIU; XU; ZOU, 2015; ALVES et al., 2018; PUGLIESE et al., 2020; FERNANDES et al., 2021; BISTAFFA et al., 2023; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023b).

Vários tipos de aparelhos expansores são empregados para a expansão da maxila, como os expansores dos tipos Haas e Hyrax, caracterizados por um parafuso de abertura paralela que possibilita aumentos semelhantes nas distâncias intercaninos e intermolares (ALVES et al., 2020). Outra alternativa de expansor é o tipo leque, que concentra a expansão na região anterior do arco dentário, sendo recomendado para casos de mordidas cruzadas na região de caninos e primeiro molares decíduos (DORUK et al., 2004; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013; GOPALAKRISHNAN e SRIDHAR, 2017; ALVES et al., 2020). Quando a mordida cruzada está localizada tanto na região anterior quanto posterior do arco dentário, com maior atresia na região de caninos, o Expansor Maxilar Diferencial (EMD) pode ser indicado (GARIB et al., 2014; ALVES et al., 2018; MASSARO et al., 2021a).

O EMD foi proposto por GARIB et al. (2014) com o propósito de corrigir atresias maxilares severas, possibilitando uma maior quantidade de expansão na região anterior em comparação à região posterior do arco dentário. Sua morfologia foi determinada com o intuito de minimizar a expansão excessiva na região de molares durante a ERM e os efeitos indesejados, como os danos periodontais nos dentes de apoio (GARIB et al., 2014; ALVES et al., 2018; ALVES et al., 2020; MASSARO et al., 2021a).

Para alcançar maior eficácia e estabilidade na ERM, é necessário considerar a posição do parafuso expensor. Esta posição pode variar nas direções vertical e anteroposterior em relação ao palato, cuja variação influencia na distribuição das forças ortopédicas e nos efeitos dentários resultantes da ERM (ARAUGIO et al., 2013; FERNANDES et al., 2019; FERNANDES et al., 2021).

Embora os estudos tenham demonstrado consistentemente que o EMD proporciona uma expansão maxilar bem-sucedida, com um maior aumento da distância intercaninos e, conseqüentemente, uma redução dos efeitos indesejados nos dentes posteriores do arco dentário (GARIB et al., 2014; GARIB et al., 2016; ALVES et al., 2018; PUGLIESE et al., 2020; MASSARO et al., 2020a), é importante realizar a avaliação biomecânica da ERM com o uso do EMD, utilizando o método de elementos finitos (MEF) (MASSARO et al., 2021a). A ausência de análise da distribuição de tensões nas estruturas esqueléticas durante o uso do EMD pode ser um fator limitante para decisões clínicas (MASSARO et al., 2021a; MASSARO et al., 2021b).

O MEF é uma técnica computacional que permite estabelecer os estados de tensão e deformação de uma estrutura submetida a forças simuladas (LEE et al., 2009; LIU; XU; ZOU, 2015; FERNANDES et al., 2019). Com esta análise, é possível compreender diferentes abordagens de tratamentos, aprimorar protocolos clínicos e aperfeiçoar determinados produtos, com o objetivo de minimizar os efeitos colaterais indesejados e de reduzir falhas em procedimentos clínicos experimentais (ARAUGIO et al., 2013; ROMMANYK et al., 2020; LAGRAVERE, 2021; KAYA; SEKER; YÜCESOY, 2023). A partir deste método, a distribuição de tensão e os efeitos esqueléticos e dentoalveolares proporcionados pelo EMD podem ser elucidados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A deficiência transversal da maxila tem sido estudada na Ortodontia há muitos anos (ANGELL, 1860; HAAS, 1961; HAAS, 1970; SILVA FILHO, 1991; GARIB et al., 2005; ALVES et al., 2018; FERNANDES et al., 2021; BISTAFFA et al., 2023; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023b). Ela é caracterizada por uma maxila com formato triangular, palato profundo e ogival, além de um estreitamento dos segmentos posteriores do arco dentário superior (HAAS 1961; HAAS, 1970). A alteração dentária comumente associada a esta deficiência é a mordida cruzada posterior que representa uma das más oclusões mais frequentes nas dentaduras decídua e mista, sendo diagnosticada em 8% a 22% dos casos (PETRÉN; BONDEMARK; SODERFELDT, 2003).

Considerando que a mordida cruzada posterior não se autocorrigue ao longo dos anos (SILVA FILHO, 1991; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013), podendo ser transferida da dentadura decídua para as dentaduras mista e permanente (PETRÉN; BONDEMARK; SODERFELDT, 2003), torna-se recomendada a correção da atresia maxilar assim que a má oclusão for diagnosticada (SILVA FILHO, 1991; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013; GOPALAKRISHNAN e SRIDHAR, 2017).

A expansão rápida da maxila (ERM) é o procedimento ortopédico de escolha para a correção da deficiência transversal maxilar (ANGELL, 1860; SILVA FILHO, 1991; GARIB et al., 2005; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013; LIU; XU; ZOU, 2015; MORDENTE et al., 2016; FERNANDES et al., 2019; BISTAFFA et al., 2023; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023a). Esta intervenção permite o aumento transversal da maxila através da distribuição de forças laterais entre os dentes posteriores e o palato (CHACONAS e CAPUTO, 1982; BIEDERMAN et al., 1968; GARIB et al., 2005), promovendo a desarticulação da sutura palatina mediana (SPM), que é representada por uma articulação de tecido conjuntivo fibroso denso com processo de ossificação tardia, localizada entre os ossos da maxila (maxila direita e esquerda) (KNAUP; YILDIZHAN; WEHRBEIN, 2004).

Os efeitos dento-esqueléticos da ERM são bem documentados na literatura ortodôntica (GARIB et al., 2005; GARIB et al., 2006; ARAUGIO et al., 2013; LIU; XU; ZOU, 2015; FERNANDES et al., 2019; MASSARO et al., 2021; BISTAFFA et al., 2023). Além da correção do arco dentário superior (GARIB et al., 2005; ALVES et al., 2018), outros benefícios também são relatados, como no tratamento de distúrbios respiratórios (DORUK et al., 2004; MORDENTE et al., 2016; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023a;

TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023b) e no desenvolvimento físico do paciente, ambos atribuídos ao maior fluxo de ar pelas vias aéreas proporcionado pela expansão maxilar (SÖKÜCÜ; DORUK; UYSAL, 2010; MORDENTE et al., 2016; MASSARO et al., 2021b; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023a; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023b).

Estudos (GARIB et al., 2006; LIU; XU; ZOU, 2015; FERNANDES et al., 2019; ALVES et al. 2020; MASSARO et al., 2021a; FERNANDES et al., 2021) demonstraram que alterações dentoalveolares ocorrem durante a ERM. Embora o objetivo seja alcançar uma expansão maxilar com mínima inclinação dos dentes envolvidos, este resultado nem sempre é obtido, devido à indesejada vestibularização dentária obtida durante o procedimento (STARNBACH e CLEALL, 1964; STARNBACH et al., 1966; HAAS, 1970; GARIB et al., 2005; GARIB et al., 2006; ARAUGIO et al., 2013; ALVES et al., 2020; MASSARO et al., 2021a; FERNANDES et al., 2021).

A inclinação vestibular dos dentes limita a expansão ortopédica, visto que há um limite clínico, representado pelas cúspides palatinas dos dentes superiores ocluídas nas cúspides vestibulares dos dentes inferiores. Quando os dentes posteriores vestibularizam além do desejado, a quantidade de ativação do parafuso expensor se torna reduzida (STARNBACH e CLEALL, 1964; STARNBACH et al., 1966; ARAUGIO et al., 2013), comprometendo a estabilidade e o bom prognóstico do tratamento (HAAS, 1970; TIMMS, 1980), além de causar danos periodontais (GARIB et al., 2006; RUNGCHARASSAENG et al., 2007; BELLUZZO et al., 2012; BRUNETTO et al., 2013; ALVES et al., 2018; ALVES et al., 2020; BISTAFFA et al., 2023). Sendo assim, a obtenção de um maior efeito ortopédico e menor movimentação dentária durante a ERM resulta em um prognóstico mais favorável em relação à estabilidade pós-contenção (STARNBACH e CLEALL, 1964; STARNBACH et al., 1966).

A expansão maxilar pode ser realizada por aparelhos expansores de diferentes desenhos (GARIB et al., 2005; LAGRAVERE; MAJOR; FLORES-MIR, 2005; GARIB et al., 2014; LIU; XU; ZOU, 2015; ALVES et al., 2020; BISTAFFA et al., 2023). Dentre eles, os expansores maxilares dos tipos Haas e Hyrax são os mais utilizados pelos ortodontistas (GARIB et al., 2005; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013; ARAUGIO et al., 2013). Ambos os expansores promovem a abertura da SPM, o aumento da largura da maxila e do perímetro do arco dentário superior por meio de ativações no parafuso expensor posicionado no centro da SPM (HAAS et al., 1961; GARIB et al., 2005; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013; GARIB et al., 2016; GOPALAKRISHNAN e SRIDHAR, 2017; FERNANDES et al., 2019).

A posição do parafuso dos expansores maxilares pode variar nas direções vertical e anteroposterior em relação ao palato. Esta variação influencia na distribuição das forças ortopédicas, nos efeitos dentários e, conseqüentemente, na eficiência e estabilidade da ERM (ARAUGIO et al., 2013; FERNANDES et al., 2019; FERNANDES et al., 2021). Estudos que avaliaram diferentes posições do Hyrax nas direções vertical e anteroposterior no palato, concluíram que o parafuso em posição mais oclusal e anterior promoveu maior esforço mecânico às estruturas, resultando em maiores distribuição de tensão na maxila (FERNANDES et al., 2019) e deslocamento dentário (FERNANDES et al., 2021).

Aproximadamente um terço dos pacientes apresenta atresia maxilar com constrição incomum, caracterizada pela região de caninos ser significativamente mais atrésica do que a região de molares (BELLUZZO et al., 2012). Diante disto, alguns pacientes podem necessitar de uma expansão maxilar diferenciada, com diferentes quantidades de ativações do expansor nas regiões de caninos e de molares (BELLUZZO et al., 2012; GARIB et al., 2014; ALVES et al., 2020). Logo, uma avaliação da constrição maxilar e a seleção criteriosa do expansor são fundamentais para a correção da morfologia maxilar específica de cada paciente (MASSARO et al., 2021b).

Os expansores dos tipos Haas e Hyrax apresentam limitações na realização de uma expansão maxilar diferenciada (GARIB et al., 2014; GARIB et al., 2016), uma vez que promovem aumentos semelhantes nas distâncias intercaninos e intermolares através da abertura paralela de suas barras ânteroposteriores (ALVES et al., 2020). Por esta razão, estudos relataram que estes expansores podem provocar uma correção insuficiente da distância intercaninos ou uma expansão excessiva da região de molares, com a tentativa de correção da constrição anterior da maxila (GARIB et al., 2014; GARIB et al., 2016; ALVES et al., 2018; PUGLIESE et al., 2020; ALVES et al., 2020).

A expansão intermolares excessiva pode resultar em uma redução significativa da espessura da tábua óssea vestibular na região posterior do arco dentário superior, uma vez que a força de expansão gera áreas de compressão nos ligamentos periodontais dos dentes de apoio e inclinação vestibular dos mesmos, o que aumenta o risco do desenvolvimento de recessões gengivais, deiscências e fenestrações ósseas (GARIB et al., 2006; RUNGCHARASSAENG et al., 2007; BELLUZZO et al., 2012; BRUNETTO et al., 2013; ALVES et al., 2020; BISTAFFA et al., 2023). Em um contexto mais específico, estudos confirmaram estes efeitos indesejados ao

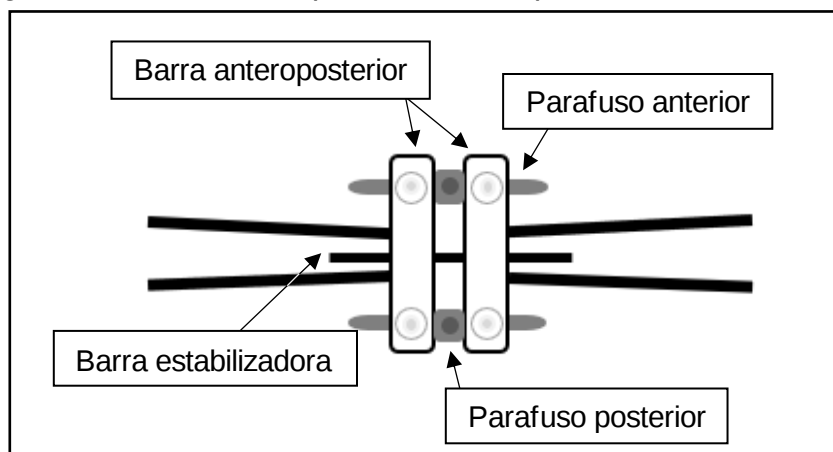
observarem diminuição na espessura da tábua óssea vestibular que variou entre 1,08mm e 2,16mm (TOKLU; GERMEC-CAKAN; TOZLU, 2015), e deiscências ósseas de aproximadamente 7,1mm na região de primeiros pré-molares e 3,8mm na região dos primeiros molares permanentes, após a utilização dos expansores Haas e Hyrax na ERM (GARIB et al., 2006).

Nos casos de constrictões maxilares com relação transversal adequada em região de molares, onde a mordida cruzada é restrita aos caninos e primeiros molares decíduos, o expansor modificado tipo leque é indicado (DORUK et al., 2004; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013; GARIB et al., 2016; GOPALAKRISHNAN e SRIDHAR, 2017; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023b). Este dispositivo aumenta apenas a distância intercaninos, com alterações insignificantes na região de primeiros molares permanentes (DORUK et al., 2004; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013; FIGUEIREDO et al., 2014; MASSARO et al., 2021a; MASSARO et al., 2021b; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023b).

Em contrapartida, quando a mordida cruzada está localizada nas regiões anterior e posterior do arco dentário, com maior constrictão maxilar na região de caninos, comumente observado em pacientes com fissuras labiopalatinas e não-fissurados com graves atresias maxilares, o Expansor Maxilar Diferencial (EMD) pode ser indicado. Este aparelho é utilizado para possibilitar uma expansão individualizada nas regiões de caninos e molares superiores, visto que o mesmo proporciona diferentes quantidades de ativações nos parafusos que o compõem. (GARIB et al., 2014; GARIB et al., 2016; ALVES et al., 2018; PUGLIESE et al., 2020; ALVES et al., 2020; MASSARAO, et al., 2021a; BISTAFFA et al., 2023; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023a; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023b).

O EMD é constituído por dois parafusos de expansão, um anterior e um posterior, e duas barras de apoio conectadas perpendicularmente a estes parafusos de expansão. Estas barras anteroposteriores servem de pivôs durante a expansão, onde é inserido um fio transversal de aço redondo de menor diâmetro (1,2mm) entre ambos os parafusos, atuando como uma barra estabilizadora durante a expansão (Figura 1) (GARIB et al., 2014).

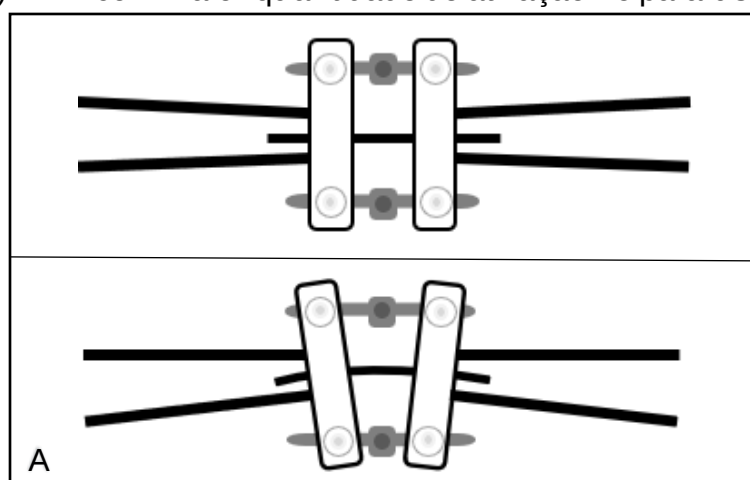
Figura 1 – Desenho esquemático do expansor maxilar diferencial



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Durante a ERM, a ativação do EMD é iniciada com ativações semelhantes nos parafusos anterior e posterior, proporcionando uma abertura do aparelho de forma paralela (Figura 2A). Ao constatar que a expansão maxilar inicial é insuficiente para a correção da atresia na região de caninos, ativações adicionais apenas no parafuso anterior são realizadas, a fim de se obter uma maior expansão na região anterior da maxila (Figura 2B) (GARIB et al., 2014).

Figura 2 – (A) EMD com ativações semelhantes nos parafusos anterior e posterior  
(B) EMD com maior quantidade de ativação no parafuso anterior



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Alguns estudos constataram um maior aumento na região anterior do arco dentário com o uso do EMD. GARIB et al. (2014), em um relato de caso, promoveram uma expansão maxilar com o uso do EMD em pacientes com fissura labiopalatina,

ativando ambos os parafusos por dez dias (cerca de 0,8mm ao dia) e o parafuso anterior por mais dois dias, com ativação de uma volta completa ao dia. Estas ativações resultaram em aumentos de 9,8mm e 9,3mm nas distâncias intercaninos e intermolares, respectivamente (GARIB et al., 2014). Em um segundo relato de caso (GARIB et al., 2014), ativações de cinco dias no parafuso posterior e nove dias no parafuso anterior foram realizadas, resultando em uma expansão de 7,5mm na distância intercaninos e de 4,5mm na distância intermolares.

Em pacientes não-fissurados, ALVES et al. (2018) realizaram ativações de dois quartos de volta pela manhã e dois quartos de volta à noite por seis dias no parafuso posterior e dez dias no parafuso anterior, resultando em uma abertura de 7,0mm da SPM, ao nível das cristas alveolares mesiais dos incisivos centrais superiores. Ao comparar o EMD com o Hyrax, ALVES et al. (2020) ativaram uma volta completa no Hyrax e no parafuso posterior do EMD por 6 dias e o parafuso anterior do mesmo por 10 dias, constatando expansões intermolares semelhantes com ambos os expansores e maior expansão intercaninos com o uso do EMD.

As diferentes quantidades de ativações dos parafusos proporcionam uma abertura de forma trapezoidal do EMD, permitindo uma expansão diferenciada com divergência anterior (Figura 2B) (GARIB et al., 2014; GARIB et al., 2016; ALVES et al., 2018; ALVES et al., 2020; PUGLIESE et al., 2020). Esta configuração de abertura do dispositivo evita a expansão excessiva na região de molares, diminuindo os efeitos periodontais indesejados nessa área. (GARIB et al., 2014).

Na tentativa de evitar os efeitos adversos da ERM, uma outra alternativa de tratamento poderia ser realizada, envolvendo o uso de dois expansores maxilares distintos para a correção das graves atresias maxilares. Inicialmente, uma expansão da maxila seria necessária, utilizando os aparelhos Haas ou Hyrax para a correção da distância intermolares (GARIB et al., 2016; ALVES et al., 2020). Após seis meses de contenção, um segundo expansor, tipo leque, promoveria o aumento da expansão na região de caninos apenas (GARIB et al., 2014; LIU; XU; ZOU, 2015; GARIB et al., 2016; ALVES et al., 2018; ALVES et al., 2020). Embora essa abordagem de tratamento seja considerada eficaz, ela não é eficiente (GARIB et al., 2016), uma vez que envolve duas intervenções de ERM, dois períodos de contenção e, conseqüentemente, maior custo de tratamento (GARIB et al., 2014; FIGUEIREDO et al., 2014; GARIB et al., 2016). Diante disto, ao buscar maior efetividade, o EMD tem sido considerado uma alternativa viável, permitindo que o profissional alcance

resultados satisfatórios em um único período de tratamento (MASSARO et al., 2021b; BISTAFFA et al., 2023).

Alguns estudos ressaltaram a importância de um conhecimento e entendimento mais aprofundados sobre os efeitos dento-esqueléticos gerados pelos diferentes tipos de aparelhos utilizados na ERM (ARAUGIO et al., 2013; LIU; XU; ZOU, 2015). Esta compreensão é considerada importante para alcançar uma expansão maxilar efetiva e bem-sucedida, com a redução dos efeitos indesejados (ARAUGIO et al., 2013; LIU; XU; ZOU, 2015). Considerando que o EMD é um expansor maxilar recente, MASSARO et al. (2021a) ressaltaram que a ausência da análise de distribuição de tensão nas estruturas anatômicas poderiam limitar algumas pesquisas clínicas relacionadas ao uso do EMD e que a análise de seus efeitos através do método de elementos finitos (MEF) seria necessária para um melhor entendimento no processo de expansão maxilar.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta de pesquisa de abordagem numérica utilizada para determinar os estados de tensão e deformação de um objeto submetido a forças externas (LEE et al., 2009; LIU; XU; ZOU, 2015; FERNANDES et al., 2019). Neste método, um modelo gráfico representativo do objeto é criado por meio de *softwares* de modelagem geométrica. Em seguida, por meio de um *software* especializado no MEF, o modelo é discretizado em pequenos elementos denominados elementos finitos, cujas propriedades físicas são semelhantes às do modelo original. Nas extremidades de cada elemento finito encontram-se pontos, denominados nós, que conectam os elementos entre si, formando uma malha bi ou tridimensional. Estes nós possuem a função de transferir informações entre os elementos (LOTTI et al., 2006; LEE et al., 2009), sendo que, quanto maior o número e a disposição dos nós, maior a precisão do modelo discretizado.

A obtenção de resultados no MEF depende da similaridade do modelo com a estrutura real a ser avaliada, da identificação efetiva das condições de contorno e das propriedades físicas atribuídas aos respectivos materiais (LEE et al., 2009). Dessa forma, estruturas complexas com geometrias irregulares, como dentes e demais estruturas craniofaciais, podem ser modeladas, permitindo a aplicação de um sistema de forças em qualquer ponto e/ou direção, o que proporciona informações sobre o deslocamento e o grau de tensão gerado por essas cargas aplicadas sobre as estruturas (LOTTI et al., 2006; LEE et al., 2009).

Uma grande vantagem da aplicação do MEF em pesquisas na área da saúde é a possibilidade de simular variadas intervenções, evitando a exposição de seres humanos e animais a possíveis efeitos indesejados e procedimentos experimentais (GOMES et al., 2006; ARAUGIO et al., 2013).

Embora a eficácia da ERM tenha sido comprovada e seus efeitos estudados ao longo das últimas décadas, a busca por novos métodos que possam aumentar sua efetividade continua (ARAUGIO et al., 2013; FERNANDES et al., 2019, FERNANDES et al., 2021). Diversos estudos tem avaliado os efeitos da ERM nos dentes, nos ossos craniofaciais e na SPM por meio do MEF (PROVATIDIS et al., 2008; HAN; KIM; PARK, 2009; ARAUGIO et al., 2013; FERNANDES et al., 2021). A partir deste método, é possível compreender melhor o comportamento mecânico dos expansores maxilares atuais (ARAUGIO et al., 2013; FERNANDES et al., 2019, 2021) e analisar a distribuição da tensão e deformação impostas às estruturas anatômicas (PROVATIDIS et al., 2008; ARAUGIO et al., 2013; SERPE et al., 2015; BOUTON et al., 2017; FERNANDES et al., 2019, FERNANDES et al., 2021; KAYA; SEKER; YÜCESOY, 2023).

A pesquisa sobre os efeitos dentários e esqueléticos com o uso EMD ainda é limitada na literatura científica. Faltam estudos que tenham investigado os efeitos do EMD através do MEF, analisando os dados sobre a distribuição de tensões e o deslocamento das estruturas durante a ERM. Além disso, os estudos clínicos disponíveis podem apresentar algumas limitações, incluindo variações no tamanho da amostra, na faixa etária dos pacientes, na quantidade de abertura dos expansores e na seleção dos dentes de apoio (LAGRAVERE; MAJOR; FLORES-MIR, 2005; ALVES et al., 2020; MASSARO et al., 2021a).

### 3 OBJETIVOS

Avaliar, através do Método de Elementos Finitos, o deslocamento dos elementos dentários e o padrão de distribuição de tensão de tração e compressão no ligamento periodontal e na estrutura maxilar, após a ativação do expansor maxilar diferencial.

#### 3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

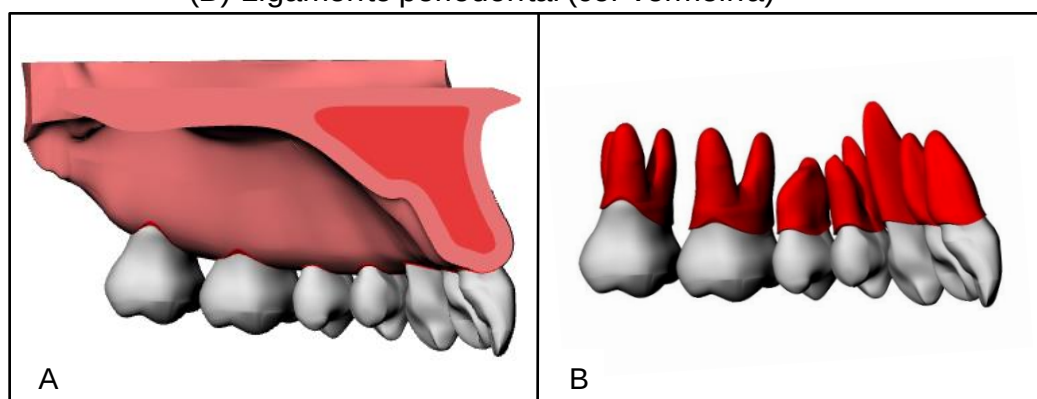
- Avaliar os deslocamentos das estruturas dentárias após diferentes ativações nos parafusos expansores anterior e posterior do EMD.
- Avaliar o padrão de distribuição de tensões de tração e compressão do ligamento periodontal após diferentes ativações nos parafusos expansores anterior e posterior do EMD.
- Avaliar o padrão de distribuição de tensão e deformação da maxila e SPM após diferentes ativações nos parafusos expansores anterior e posterior do EMD.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em parceria com o Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI – Campinas, São Paulo, Brasil), no qual foram desenvolvidos os modelos para as simulações e análises através do método de elementos finitos.

Partindo de um modelo anatômico desenvolvido por tecnologia BioCAD, os seguintes componentes anatômicos da maxila foram determinados: ossos trabecular e cortical, elementos dentários (incisivo central, incisivo lateral, canino, primeiro pré-molar, segundo pré-molar, primeiro molar e segundo molar) (Figura 3A), ligamento periodontal (Figura 3B), base do crânio (ossos frontais, zigomático, nasal e esfenóide) e unidade funcional osso-sutura, representando a SPM. Este modelo apresentou características de um paciente adulto, sem evidências de assimetrias, reabilitação protética e alterações craniofaciais, congênita ou adquiridas.

Figura 3 – (A) Modelo da maxila e componentes anatômicos: coroa dentária (cor branca), osso cortical (cor rosa), osso trabecular (cor vermelha)  
(B) Ligamento periodontal (cor vermelha)

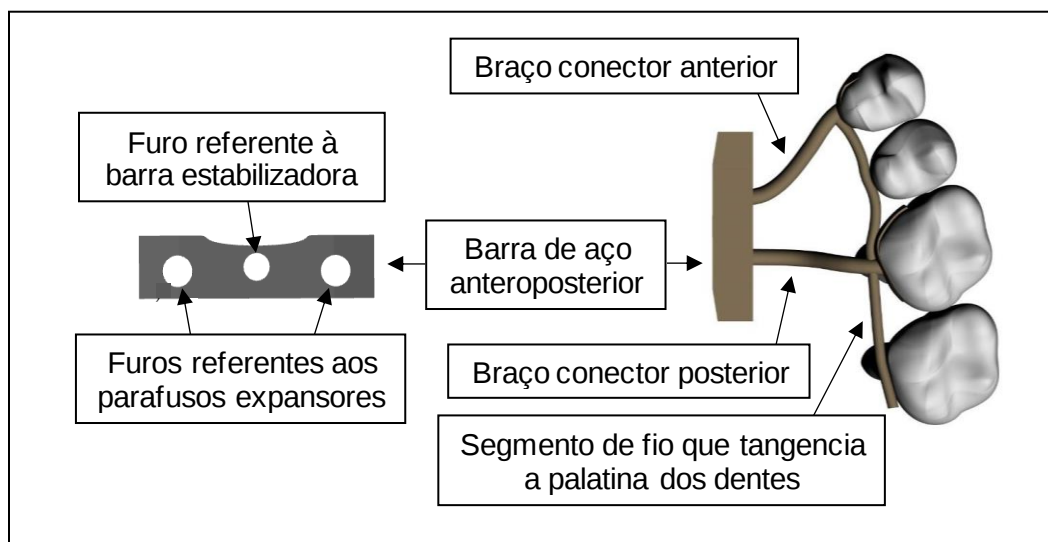


Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

Em seguida, o EMD foi modelado através do software Rhinoceros 7® (Robert McNeel & Associates, Seattle, USA), seguindo as formas e dimensões do dispositivo físico. Este dispositivo foi constituído por uma barra de aço anteroposterior com dimensões 17,4mm x 4,4mm x 3,8mm, apresentando dois orifícios de passagem para os parafusos expansores de 2,2mm de diâmetro e um orifício mediano de menor diâmetro referente à passagem de uma barra estabilizadora (Figura 4). Foram inseridos dois braços conectores (anterior e posterior) de diâmetro igual a 1,5mm que proporcionaram a união da barra de aço anteroposterior a um outro segmento de fio

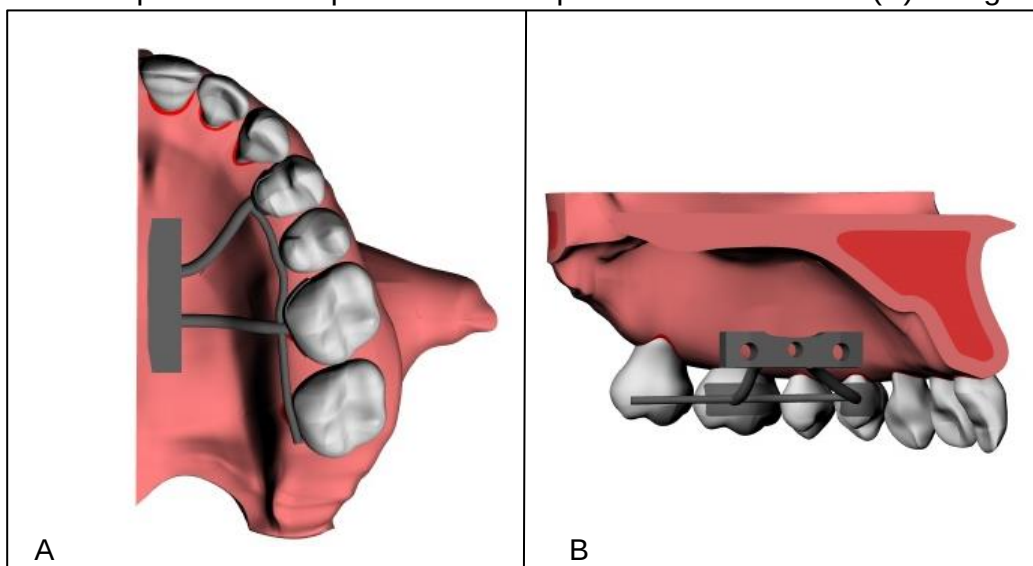
de menor diâmetro (0,5mm). Este, por sua vez, tangenciou a face palatina das coroas do primeiro pré-molar, segundo pré-molar, primeiro molar e segundo molar, sendo que o primeiro pré-molar e o primeiro molar apresentaram bandas de união fio-dente com altura de 4mm e espessura de 0,2mm (Figura 5A).

Figura 4 – Componentes constituintes do dispositivo EMD



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

Figura 5 – Dispositivo EMD posicionado no palato em vistas axial (A) e sagital (B).

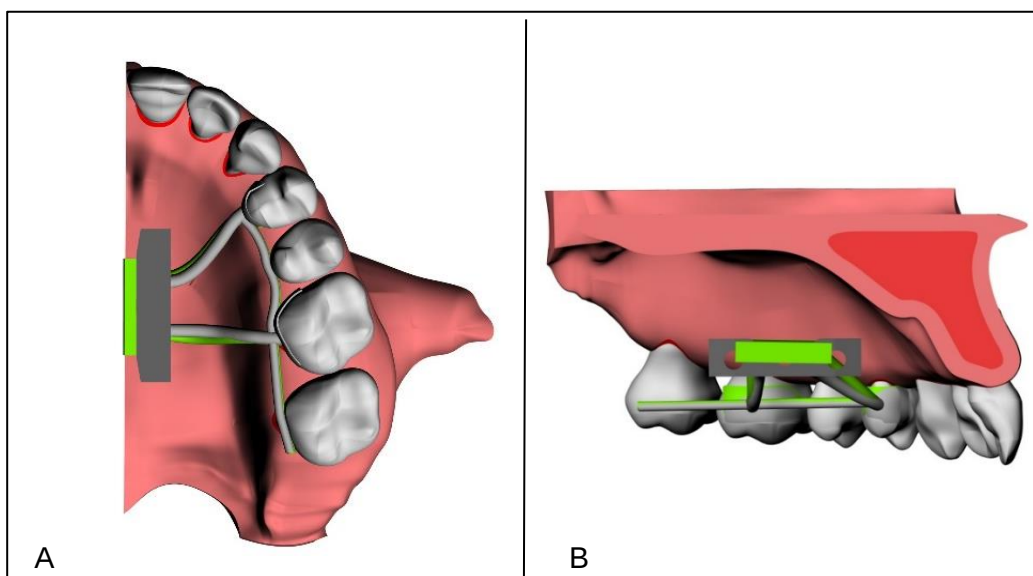


Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

O EMD foi incorporado sobre o palato do modelo geométrico com o orifício referente ao parafuso anterior posicionado em direção ao ponto de contato entre os

pré-molares, enquanto o orifício do parafuso posterior foi direcionado para o centro da face palatina do primeiro molar (Figura 5A). Em direção vertical, o dispositivo foi alocado a 15mm acima do plano oclusal (Figura 5B) (FERNANDES et al., 2019; FERNANDES et al., 2021). As figuras 6A e 6B demonstram a incorporação do EMD (estrutura em cor cinza) sobre o palato, seguindo a posição do dispositivo Hyrax (estrutura em cor verde) analisado anteriormente por FERNANDES et al. (2019) e FERNANDES et al. (2021).

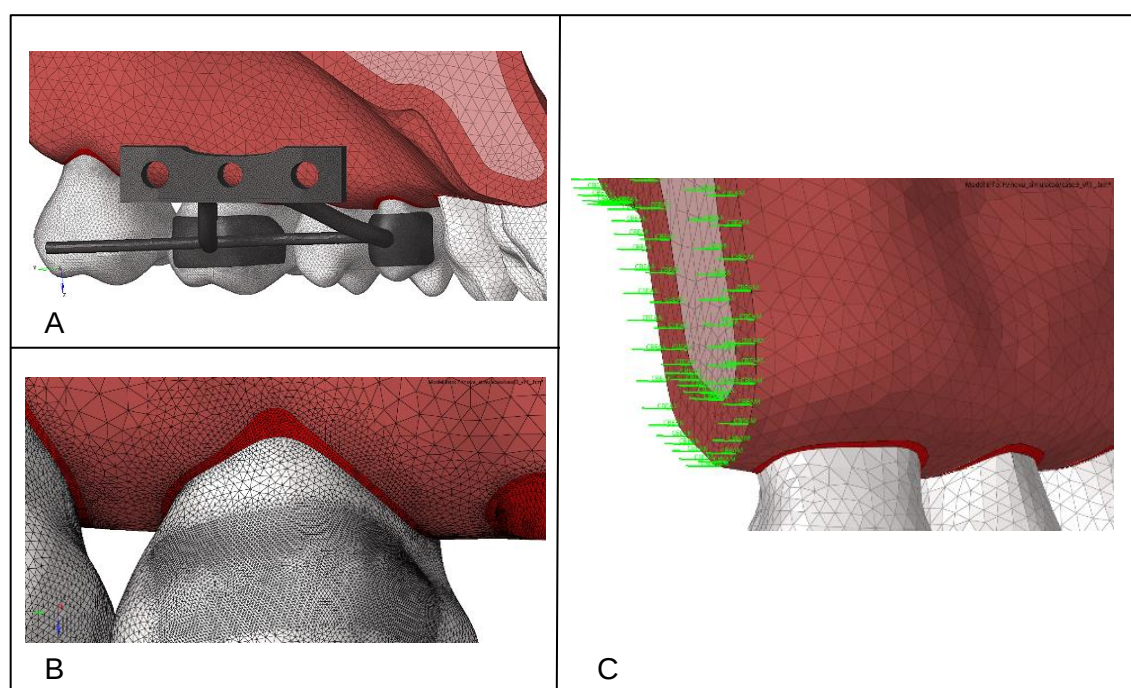
Figura 6 – Vistas axial (A) e sagital (B) do dispositivo EMD (cor cinza) sobreposto ao dispositivo hyrax (FERNANDES et al., 2019; FERNANDES et al., 2021) (cor verde).



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

Os modelos finalizados foram exportados para o *software* Hypermesh 2021 (Altair Engineering, Michigan, USA) para a criação de uma malha tridimensional composta de elementos finitos tetraédricos (Figuras 7A e 7B), definição das propriedades dos materiais e condições de carregamento e contorno. A Tabela 1 descreve o número de nós e elementos da malha presentes no modelo.

Figura 7 - (A) Modelo em elementos finitos, composto por elementos tetraédricos. (B) Região de refinamento da malha, evidenciando a diferença de tamanhos dos elementos. (C) Elementos em barra 1D, usados para representar a SPM (cor verde).



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

Tabela 1 - Quantidade de elementos e nós da malha

| Modelo   | Quantidade de Elementos | Quantidade de Nós |
|----------|-------------------------|-------------------|
| Malha 3D | 2068776                 | 429354            |
| Malha 1D | 220                     | 440               |

Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2023)

Para as simulações em elemento finito, foram considerados espessura óssea de 2mm e elementos em barras unidimensionais com propriedades elásticas para representar a SPM, como visualizado na figura 7C. Estes elementos permitiram a análise das tensões de tração e compressão obtidas na região de SPM durante as ativações do dispositivo. As demais estruturas do modelo foram identificadas com propriedades específicas de cada material, determinado por Coeficiente de Poisson e Módulo de Young (Tabela 2), com características elásticas, isotrópicas, lineares e homogêneas.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas atribuídas às estruturas do modelo geométrico

| <b>Material</b>                    | <b>Coefficiente de Poisson</b> | <b>Módulo de Young (MPa)</b> |
|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Osso cortical <sup>a</sup>         | 0,30                           | 13700                        |
| Osso trabecular <sup>a</sup>       | 0,30                           | 1370                         |
| Dente <sup>b</sup>                 | 0,30                           | 20000                        |
| Ligamento Periodontal <sup>c</sup> | 0,49                           | 0,69                         |
| Aparelho EMD (aço) <sup>a</sup>    | 0,33                           | 200000                       |
| SPM <sup>d</sup>                   | 0,49                           | 1                            |

Fonte: a - SERPE et al. (2015); b - SERPE et al. (2014); c - ANDERSON; PEDERSEN; MELSEN (1991); d - TANNE; HIRAGA; SAKUDA (1989).

Três simulações distintas de ativações do EMD foram realizadas através do MEF. Em todas as simulações, os parafusos anterior e posterior foram posicionados no sentido transversal, centralizados no palato do modelo e paralelos ao plano oclusal.

No modelo M1, ativações de 0,25mm foram simuladas em ambos os parafusos anterior e posterior. No modelo M2, uma ativação de 0,25mm foi adicionada apenas no parafuso anterior, totalizando uma abertura de 0,5mm na região anterior e 0,25mm na região posterior. E no modelo M3, apenas o parafuso anterior do dispositivo foi ativado 0,25mm (Tabela 3).

Tabela 3 – Modelos de elementos finitos em relação à variação de abertura do EMD

| <b>Aberturas dos parafusos</b> | <b>Expansor Maxilar Diferencial</b> |                           |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|                                | <b>Parafuso Anterior</b>            | <b>Parafuso Posterior</b> |
| <b>M1</b>                      | 0,25mm                              | 0,25mm                    |
| <b>M2</b>                      | 0,5mm                               | 0,25mm                    |
| <b>M3</b>                      | 0,25mm                              | Sem ativação              |

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Uma condição de contorno rígida aplicada às partes superior e posterior do osso maxilar foi definida para a análise da distribuição de tensão e de deslocamento nas estruturas, a fim de restringir movimentos vertical, anteroposterior e transversal do modelo. As ativações do dispositivo EMD foram realizadas por meio de um

deslocamento forçado na direção de expansão maxilar, cuja aplicação esteve presente na região central dos parafusos anterior e posterior.

Na região de SPM, uma condição de simetria matemática foi desenvolvida e a carga aplicada foi recriada simetricamente no lado oposto para a obtenção de resultados equivalentes em ambos os hemiarcos. Foi simulado 0,25mm no centro do parafuso e, considerando a simetria, a ativação do EMD apresentou equivalência a 0,5mm em cada ativação dos parafusos anterior e posterior.

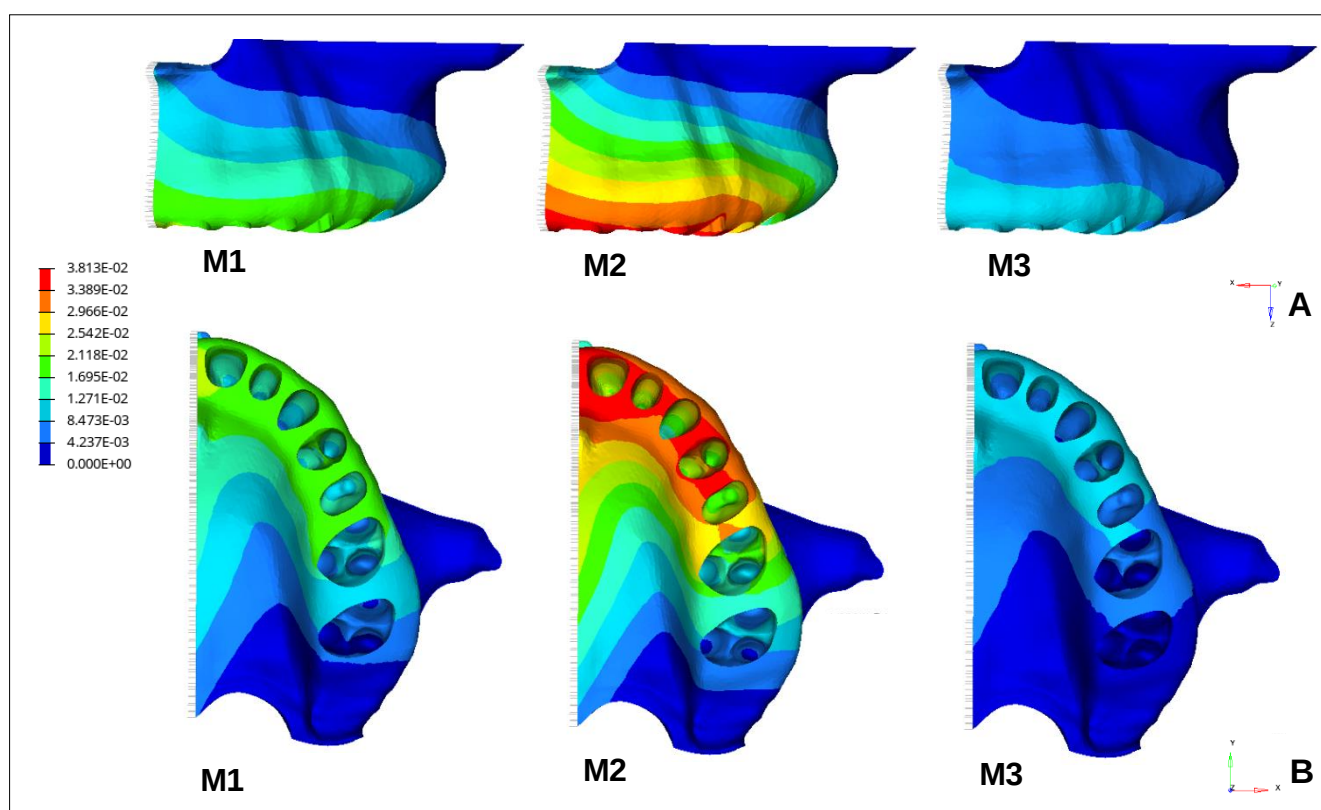
## 5 RESULTADOS

### 5.1 DESLOCAMENTO TRANSVERSAL DA MAXILA

Ao analisar o deslocamento transversal da maxila após as simulações de aberturas do EMD, constatou-se que todos os modelos apresentaram uma expansão maxilar em formato de “V”, com maior abertura das regiões alveolar em vista coronal (Figura 8A) e anterior da maxila em vista axial (Figura 8B).

A expansão maxilar diferenciou-se na quantidade de deslocamento transversal da maxila entre os modelos. Em M2, o deslocamento transversal máximo foi observado na região anterior de processo alveolar, estendendo-se à mesial de segundo pré-molar. Uma maior quantidade de deslocamento foi visualizada em áreas mais superior e posterior do modelo M2, quando comparada a M1 e M3. Este, por sua vez, apresentou o menor deslocamento maxilar, enquanto em M1 ocorreu de forma mais homogênea na região entre incisivo central e primeiro molar.

Figura 8 – Deslocamento (em milímetros) da maxila em A, plano coronal, e em B, plano axial



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

## 5.2 TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA NA MAXILA

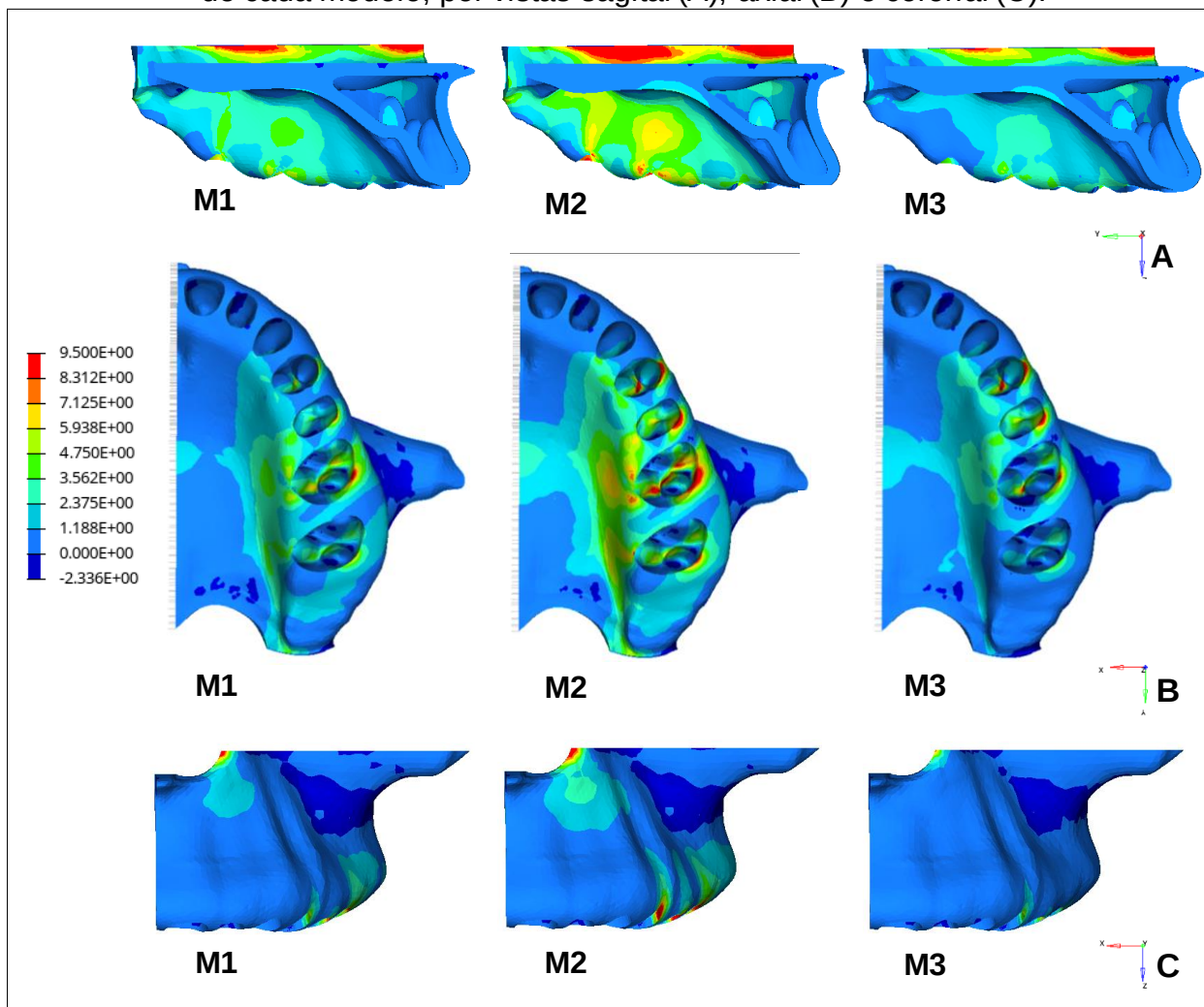
Na avaliação da distribuição de tensão na maxila em vistas sagital (Figura 9A) e axial (Figura 9B), a tensão no modelo M1 concentrou-se na região mais posterior do processo alveolar, entre o segundo pré-molar e segundo molar, com tensão máxima de 4,75MPa na região palatina (Figura 9A). A tensão desviou-se da região de SPM (Figura 9A), dissipando-se em direções anterior (região de canino) e posterior (processo pterigóideo), com maior intensidade da dissipação para a região posterior. Uma pequena área na região disto-vestibular de crista óssea alveolar do segundo pré-molar e do primeiro molar apresentou valor máximo de tensão de tração (9,50MPa) (Figura 9B).

O modelo M3 apresentou concentração de tensão de tração em região mais anterior em relação a M1, entre canino e primeiro molar (Figuras 9A e 9B), com valor aproximado de 4,75MPa na superfície palatina do processo alveolar. Uma tensão de 2,37MPa foi verificada no centro da SPM (Figura 9A) e tensão máxima de 9,50MPa foi observada na crista alveolar disto-vestibular do primeiro pré-molar, segundo pré-molar e primeiro molar, bem como nas regiões de furcas do primeiro pré-molar e do primeiro molar.

No modelo M2, foi possível observar que as tensões se concentraram em uma maior área da região palatina do processo alveolar, entre o canino e o segundo molar, cujo valor máximo de 9,50MPa foi identificado na crista óssea disto-vestibular do primeiro pré-molar, segundo pré-molar, primeiro molar e segundo molar, bem como nas regiões de furca do primeiro pré-molar e primeiro molar (Figura 9B). Houve um aumento da intensidade de tensão de tração distribuída em direção às regiões anterior da maxila, processo pterigóideo (Figura 9B) e de SPM em relação aos modelos M1 e M3 (Figura 9A). O modelo M2 apresentou semelhança com M1 na região posterior e com M3 na região anterior da maxila.

Em perspectiva coronal (Figura 9C), tensão de tração foi verificada na região nasal dos modelos M1, M2 e M3, cuja maior área e intensidade foi identificada em M2. O mesmo ocorreu na superfície vestibular do processo alveolar, apresentando a maior área de distribuição de tensão nesta região.

Figura 9 – Tensão principal máxima, em megapascal, distribuída ao longo da maxila de cada modelo, por vistas sagital (A), axial (B) e coronal (C).



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

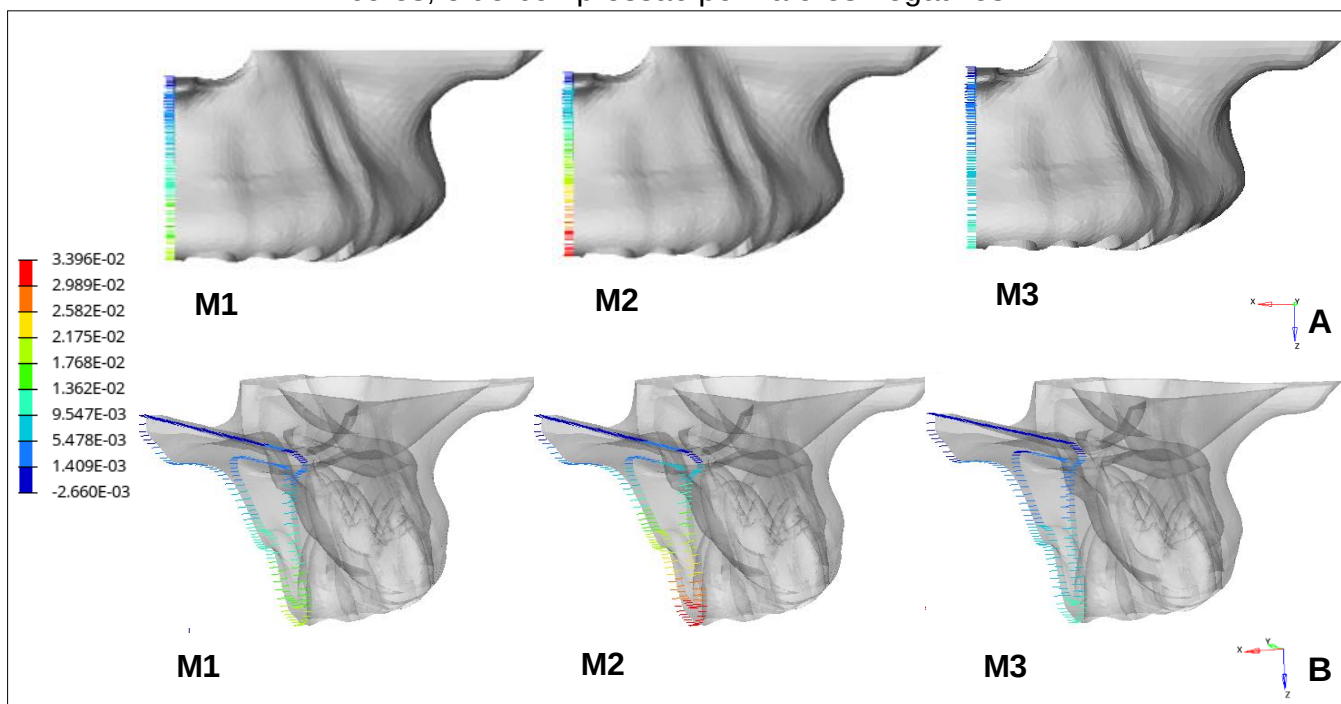
### 5.3 TENSÃO NA SUTURA PALATINA MEDIANA

Na análise da distribuição de tensão na SPM em vistas coronal (Figura 10A) e sagital (Figuras 10B), a tensão de compressão, representada por valores negativos na escala, foi identificada na região superior enquanto a tensão de tração, identificada por valores positivos, foi visualizada nas regiões média e ântero-inferior da maxila em todos os modelos (Figura 10B), corroborando com a expansão da maxila em forma de “V”, observado no deslocamento maxilar (Figura 8).

Níveis mais baixos de tensão de tração foram identificados na SPM de M3, associando-se com o menor deslocamento da maxila. Em M2, maiores níveis de

tensão de tração foram verificados nas regiões média e inferior da SPM, enquanto em M1 houve uma distribuição mais homogênea das tensões.

Figura 10 – Tensão de tração, representada por valores positivos na escala de cores, e de compressão por valores negativos.



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

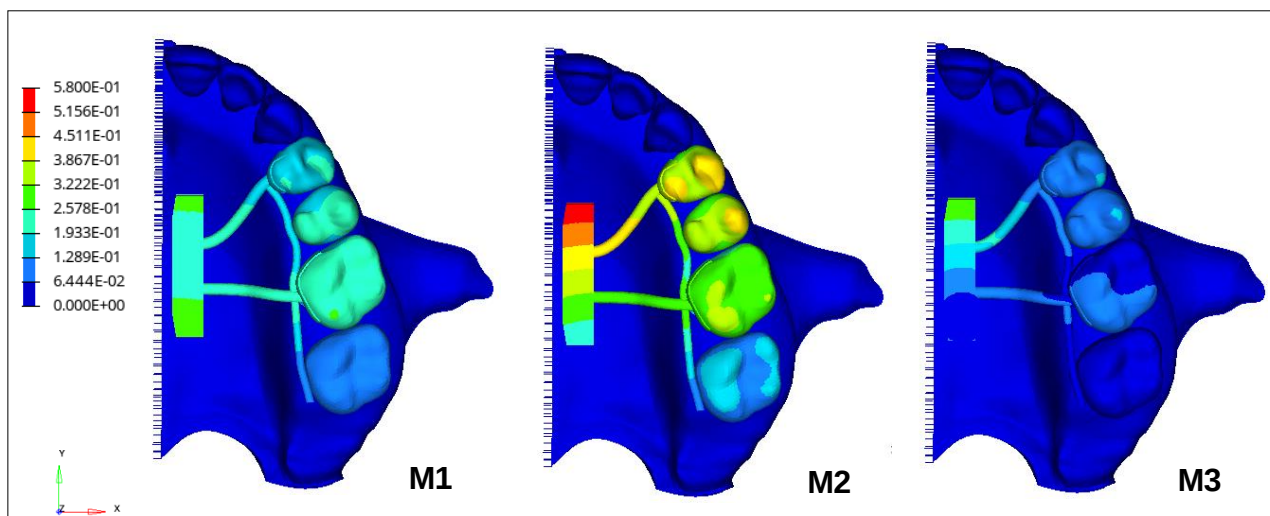
## 5.4 DESLOCAMENTO DENTÁRIO

Os deslocamentos dentários foram analisados de forma total, bem como isoladamente nos eixos vertical e horizontal de cada modelo.

### 5.4.1 Deslocamento Total

O deslocamento dentário total foi avaliado sob perspectiva axial, representado em cada modelo da Figura 11.

Figura 11 – Vista axial do deslocamento dentário total (em milímetros) dos modelos simulados.



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

Os modelos M1, M2 e M3 apresentaram padrões distintos de deslocamento dentário total. No modelo M2, o deslocamento máximo de aproximadamente 0,45mm foi observado nos pré-molares, com o primeiro pré-molar exibindo maior área de movimentação em comparação ao segundo pré-molar. Já no modelo M3, houve um equilíbrio de deslocamento entre os pré-molares, variando entre 0,13mm e 0,19mm, seguido pelo primeiro molar que obteve menor deslocamento. Em M1, a configuração de deslocamento dentário mostrou-se mais distinta, com o primeiro molar apresentando maior tendência de deslocamento, em torno de 0,26mm, em relação aos pré-molares. O deslocamento máximo no primeiro molar abrangeu toda a extensão coronária, seguido pelo segundo pré-molar e primeiro pré-molar que obtiveram menores áreas de deslocamento máximo.

Em todos os modelos, o segundo molar apresentou menor deslocamento em comparação com os demais dentes.

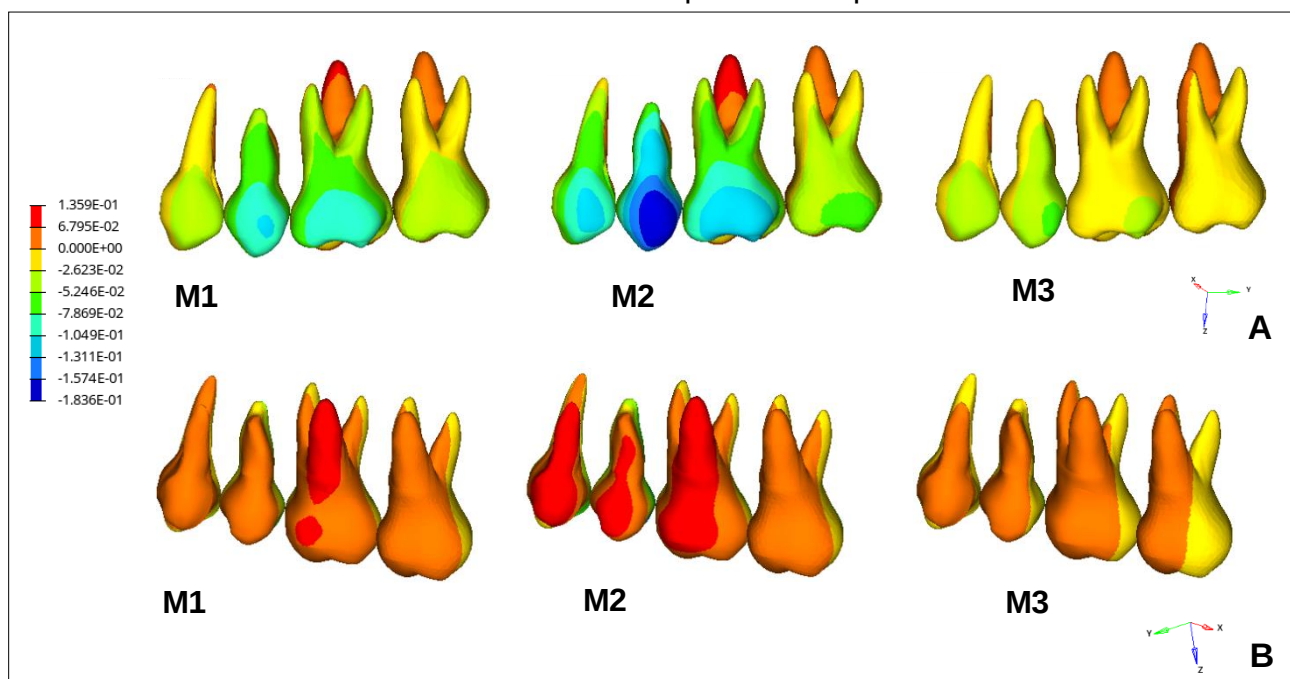
No modelo M2, as ativações do dispositivo resultaram em um deslocamento máximo de 0,58mm aproximadamente, identificado pela cor vermelha na região do parafuso anterior, enquanto em M3 o deslocamento foi de 0,32mm. Este valor também foi identificado tanto nas áreas do parafuso anterior quanto do posterior em M1. A distribuição de carga em direção aos dentes também foi considerada maior em M2, conforme observado nos segmentos dos fios conectores de maior e menor diâmetros

do EMD, que apresentaram maior quantidade de deslocamento em relação aos demais modelos.

#### 5.4.2 Deslocamento Vertical

O deslocamento de intrusão dos dentes foi representado por valores negativos na escala, enquanto os valores positivos referiram-se ao deslocamento de extrusão. Constatou-se que todos os dentes apresentaram tendência de intrusão da face vestibular (Figura 12A) e de extrusão da face palatina (Figura 12B), diferenciando-se na quantidade de deslocamento de cada dente.

Figura 12 – Delocamento dentário (em milímetros) no sentido de intrusão visto por vestibular (A) e de extrusão visto por palatina (B). Na escala de cores, o deslocamento de intrusão está representado por valores negativos e o deslocamento de extrusão por valores positivos



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

O modelo M2 apresentou movimentos verticais mais expressivos, enquanto os menores deslocamentos foram observados em M3. Apesar desta diferença, ambos os modelos, M2 e M3, mostraram um padrão semelhante de intrusão vestibular, com o segundo pré-molar apresentando maior intrusão vestibular de coroa e raiz em comparação com o primeiro pré-molar e primeiro molar, cujos deslocamentos foram

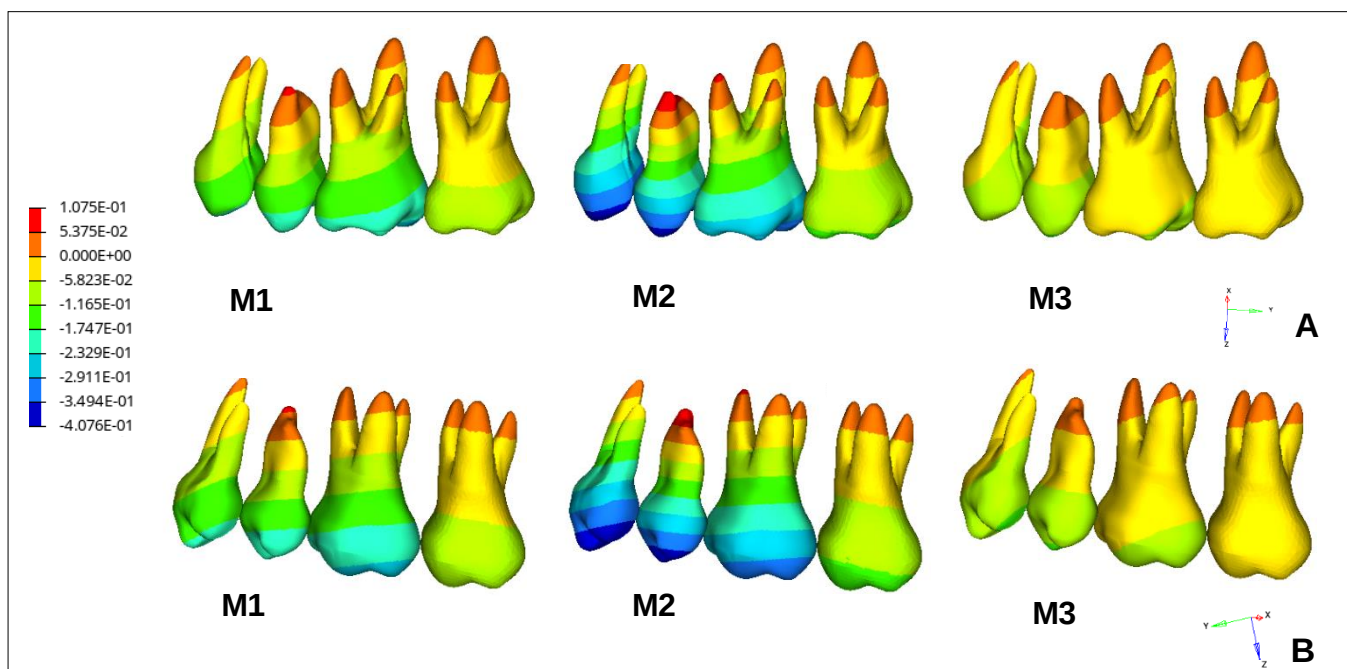
semelhantes. Já no modelo M1, tanto o segundo pré-molar quanto o primeiro molar apresentaram maior intrusão vestibular do que o primeiro pré-molar.

Por vista palatina (Figura 12B), o deslocamento máximo de extrusão de 0,13mm foi verificado nas coroas e nas raízes do primeiro pré-molar, do segundo pré-molar e do primeiro molar em M2, bem como no primeiro molar de M1. Em M3, a extrusão palatina foi mais homogênea entre todos os dentes, não havendo discrepâncias de deslocamentos entre pré-molares e molares.

### 5.4.3 Deslocamento Horizontal

A avaliação isolada do deslocamento horizontal (Figura 13) mostrou tendência de movimentação das coroas dentárias no sentido vestibular (Figura 13A) e da região apical das raízes no sentido palatino (Figura 13B). O deslocamento palatino foi representado por valores positivos na escala de cores, enquanto o deslocamento em sentido vestibular, por valores negativos.

Figura 13 – Delocamento dentário horizontal (em milímetros) por vistas vestibular (A) e palatina (B). Na escala de cores, o deslocamento vestibular está representado valores negativos e o deslocamento palatino por valores positivos.



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

Os modelos M2 e M3 apresentaram maior vestibularização do primeiro pré-molar, seguido do segundo pré-molar e do primeiro molar. No entanto, em M2, o deslocamento vestibular alcançou maior expressividade em relação aos modelos M1 e M3, obtendo valores máximos de 0,41mm nos pré-molares e 0,35mm no primeiro molar. Uma condição distinta de deslocamento horizontal foi verificada em M1, no qual o primeiro molar apresentou maior vestibularização, seguido do segundo pré-molar e do primeiro pré-molar. Em todos os modelos, o segundo molar obteve menor vestibularização coronária em relação aos demais dentes, apresentando maior movimentação em M2 e menor em M3.

Embora tenha observado uma variação na intensidade de vestibularização nos pré-molares e molares de todos os modelos, o deslocamento da região apical no sentido palatino não apresentou discrepâncias de valores, mostrando semelhança na quantidade de deslocamento entre todos os dentes.

## 5.5 TENSÃO DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO DO LIGAMENTO PERIODONTAL

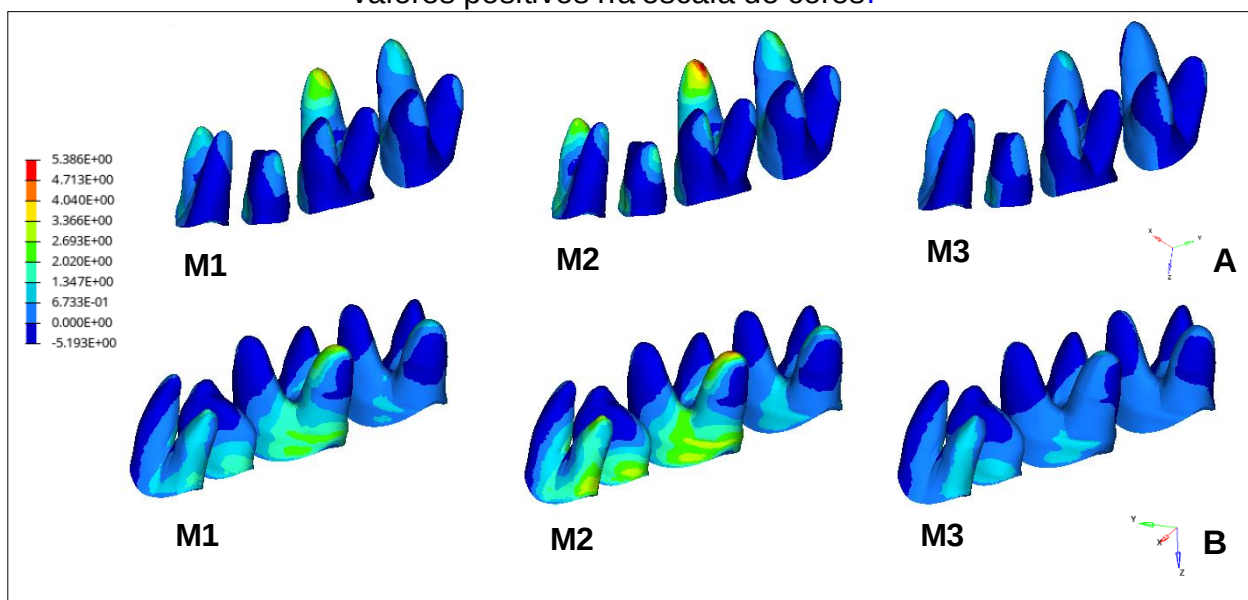
Além dos deslocamentos dentários, o MEF também possibilitou a avaliação das tensões principais máxima e mínima, identificadas por tensões de tração e de compressão localizadas em áreas que representaram os ligamentos periodontais nas superfícies radiculares dos dentes. Nas imagens a seguir, a tensão de tração foi representada por valores positivos (Figuras 14), enquanto a tensão de compressão por valores negativos na escala de cores (Figuras 15).

Em todos os modelos, uma maior área de tensão de tração foi identificada na superfície palatina da região cervical e na superfície vestibular da raiz palatina dos dentes (Figuras 14), enquanto a tensão de compressão localizou-se na cervical da superfície vestibular e na palatina das raízes vestibulares, sobretudo nos terços apicais radiculares dos modelos (Figura 15).

Os valores máximos de tensões de tração e de compressão foram observados em M2, na superfície vestibular do terço apical da raiz palatina do primeiro molar (5,39MPa) e no ápice da raiz vestibular do segundo pré-molar (5,48MPa) respectivamente. Em M1, uma maior tensão foi observada no primeiro molar, enquanto o modelo M3 obteve tensões de tração e compressão de forma mais homogênea, com áreas de tensões máximas ligeiramente maiores no primeiro pré-

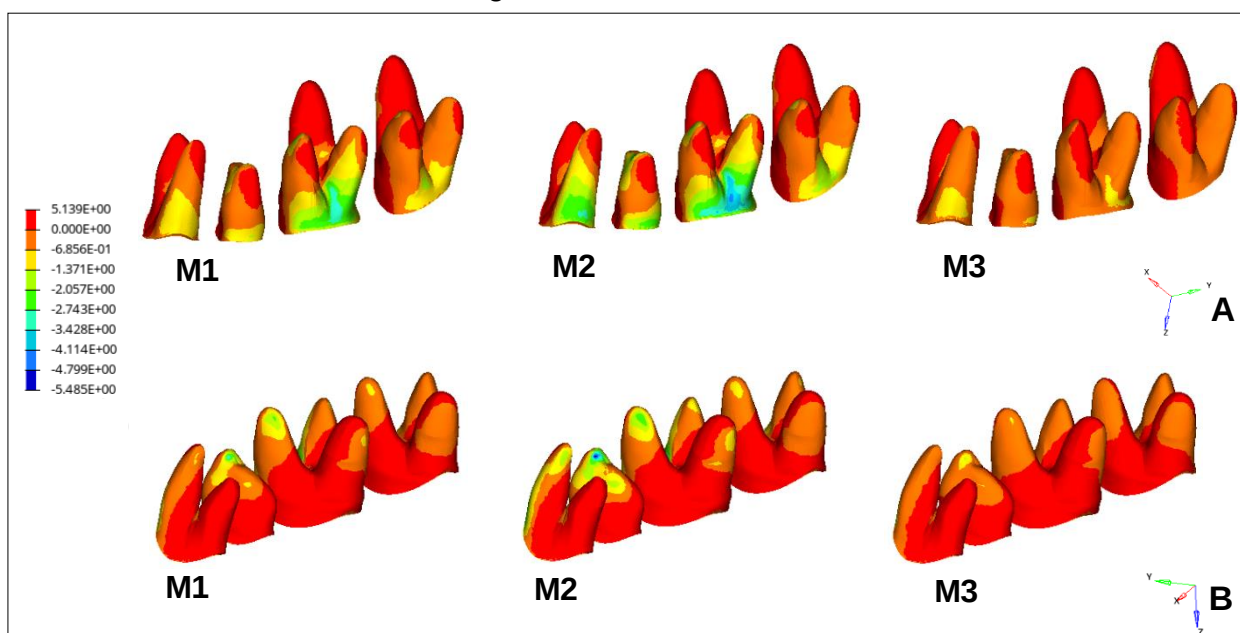
molar. Neste modelo, identificou-se uma menor tensão distribuída aos dentes em comparação aos modelos M1 e M2.

Figura 14 – Distribuição de tensão de tração (em Megapascal) no ligamento periodontal por vistas vestibular (A) e palatina (B), representada por valores positivos na escala de cores.



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

Figura 15 – Distribuição de tensão de compressão (em mega Pascal) no ligamento periodontal por vistas vestibular (A) e palatina (B), representada por valores negativos na escala de cores.



Fonte: CTI – Campinas, São Paulo, Brasil (2024)

## 6 DISCUSSÃO

Na Ortodontia, o MEF é uma importante ferramenta computacional para avaliações biomecânicas difíceis de serem realizadas clinicamente (BOUTON et al., 2017; ROMMANYK et al., 2020; KAYA; SEKER; YÜCESOV, 2023). A análise com elementos finitos possibilita um entendimento mais aprofundado sobre o comportamento mecânico dos diferentes tipos de expansores maxilares utilizados atualmente (ARAUGIO et al., 2013; HARTONO; SOEGIHARTO; WIDAYATI, 2018; KAYA; SEKER; YÜCESOY, 2023). Considerando que o EMD é um expansor maxilar recente (GARIB et al., 2014), a análise da distribuição de tensões e deformações impostas às estruturas anatômicas é importante para a melhor elucidação do processo de expansão maxilar com o uso do EMD.

Estudos, utilizando o MEF, investigaram os efeitos da ERM na maxila (FERNANDES et al., 2019) e nos dentes (FERNANDES et al., 2021) com o uso do Hyrax, ao simular diferentes posições do parafuso expansor nas direções vertical e anteroposterior no palato. FERNANDES et al. (2019) concluíram que a posição mais oclusal e anterior do parafuso expansor, especificada no modelo M4, apresentou maior eficácia na transferência de tensão na estrutura óssea. Esta mesma posição também resultou maior carga mecânica transferida aos dentes, promovendo maior deslocamento dentário (FERNANDES et al., 2021). A partir destes resultados, o presente estudo baseou-se para determinar a posição do EMD sobre o palato do modelo computacional analisado.

Para a simulação das ativações do EMD, considerou-se que o comportamento das diferentes estruturas do modelo seria determinado independentemente da idade do paciente, apresentando propriedades específicas como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, assim como foi abordado em outros estudos (TANNE; HIRAGA; SAKUDA, 1989; SERPE et al., 2015; FERNANDES et al., 2019). A resistência gerada pelas suturas zigomaticomaxilares como resposta do complexo craniofacial às forças de expansão foi considerada por meio de uma condição de contorno rígida aplicada às partes superior e posterior do osso maxilar.

Ao analisar os modelos, verificou-se que o EMD, em M2, demonstrou maior transferência de esforço mecânico para a maxila, gerando níveis mais elevados de tensões em relação aos modelos M1 e M3. Estas tensões se concentraram na região palatina do processo alveolar, entre o primeiro pré-molar e segundo molar, que se

propagaram para as regiões de canino, SPM e processo pterigoideo (Figuras 9A e 9B). O processo pterigoideo é uma estrutura óssea conhecida por concentrar tensão durante a expansão maxilar e, conseqüentemente, resistir à abertura transversal (CHACONAS e CAPUTO et al., 1982; MATSUYAMA et al., 2015). Ao utilizar o Hyrax na ERM, FERNANDES et al. (2019) observaram uma distribuição de tensão distinta na maxila, com dissipação da região anterior do palato, próximo ao forame incisivo e incisivos centrais, em direção às regiões posterior e lateral da maxila.

LIU; XU; ZOU (2015) salientaram que a concentração de tensão na região anterior da maxila nas primeiras etapas de ativação do parafuso expensor é considerado um fator contribuinte para a abertura inicial da SPM. Todavia, este fator não foi corroborado nos modelos do presente estudo com o uso do EMD, uma vez que o mesmo promoveu abertura da SPM com maiores concentrações de tensões localizadas lateralmente na região palatina do processo alveolar (Figuras 9A e 9B). Uma possível justificativa para a abertura inicial da SPM com a área de concentração de tensões localizada nesta região seria a presença dos parafusos expansores anterior e posterior do EMD em regiões distintas sobre o palato, resultando em uma maior distribuição de tensão ao longo da SPM e, conseqüentemente, promovendo sua abertura.

O padrão de abertura piramidal da SPM encontrado em M1, M2 e M3 (Figuras 10) pode estar associado aos diferentes níveis de resistência presente ao longo do seu comprimento e à presença do processo pterigoideo articulado posteriormente à maxila, o qual limita a ERM nesta região (CHACONAS e CAPUTO, 1982; MATSUYAMA et al., 2015; FERNANDES et al., 2019). Esta abertura da SPM com vértice superior e posterior também foi observada em diversos estudos<sup>12,15,23,24,32,33</sup>, porém dependendo do design do aparelho, isto pode ocorrer em graus diferentes. Em um estudo clínico realizado, GARIB et al. (2005), observaram um menor aumento transversal da maxila próximo ao assoalho nasal em comparação com o arco dentário com o uso do Hass e do Hyrax. Este resultado foi atribuído à vestibularização dos dentes posteriores e à rotação lateral dos segmentos maxilares direito e esquerdo com vértice próximo à sutura frontomaxilar (GARIB et al., 2005).

O modelo M2 demonstrou maior abertura da SPM em relação a M1 e M3 (Figura 10), devido às ativações dos parafusos nas regiões anterior e posterior do palato com sobrecarga anterior. Esta maior quantidade de ativação no parafuso anterior possibilitou o aumento na distribuição de tensão na região anterior da SPM (Figura

9A), diferenciando-se de M1. Ao mesmo tempo, a abertura do parafuso na região posterior do palato minimizou a resistência da região posterior da maxila, diferenciando-se de M3 e, conseqüentemente, viabilizando maior abertura ao longo da SPM.

Em ensaios clínicos randomizados (ALVES et al., 2020; MASSARO et al., 2021b), ALVES et al. (2020), ao avaliarem os efeitos dos aparelhos EMD e Hyrax, concluíram que o EMD promoveu maior abertura da SPM e maior efeito ortopédico em relação ao expensor Hyrax, devido à maior quantidade de ativação do parafuso expensor na região anterior do palato. MASSARO et al. (2021b) também observaram que o EMD proporcionou maior expansão lateral da maxila em relação ao expensor tipo leque, devido à ativação do parafuso posterior do EMD, já que ambos os dispositivos comumente concentraram a maior abertura do parafuso na região anterior do palato. No modelo M2 do presente estudo, foi possível verificar que a abertura do aparelho de forma trapezoidal possibilitou maior transferência de esforço mecânico do EMD para o osso maxilar, bem como para a SPM, o que explica o maior deslocamento transversal da maxila durante a ERM (Figuras 8).

O aumento na largura da cavidade nasal também é considerado um dos efeitos da ERM (GOPALAKRISHNAN e SRIDHAR, 2017; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023a). Neste estudo, o modelo M2 resultou em uma maior área de tensão máxima na região nasal (Figuras 9A e 9C). O maior aumento da cavidade nasal com a abertura trapezoidal do EMD também foi observada em ensaios clínicos randomizados (MASSARO et al., 2021b; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023a). TEIXEIRA; MASSARO; GARIB et al. (2023a), ao compararem as alterações na região nasal entre o EMD e o tipo leque, através da análise com tomografia computadorizada de feixe cônico, constataram que o EMD promoveu maior aumento transversal nas regiões anterior e posterior do terço inferior da cavidade nasal. MASSARO et al. (2021b) também observaram maior expansão da cavidade nasal após o uso do EMD em comparação ao expensor tipo leque.

O modelo M3 apresentou uma menor concentração de tensão na região nasal em relação a M1 e M2 (Figura 9C), apesar de a abertura ocorrer no parafuso anterior do dispositivo. Do mesmo modo, o expensor tipo leque, cuja ativação também ocorre na região anterior do palato, produziu menor aumento transversal da cavidade nasal em comparação com o hyrax (DORUK et al., 2004; ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ, 2013) e com a

abertura trapezoidal do EMD (MASSARO et al., 2021b; TEIXEIRA; MASSARO; GARIB, 2023a).

Os efeitos da ERM com o uso do EMD não se limitaram exclusivamente à SPM. Ao analisar as aberturas do EMD, observou-se máximo deslocamento da extremidade anterior da barra anteroposterior do aparelho em M2 (Figura 11), o que possibilitou maior transferência de carga mecânica à região anterior do arco dentário, promovendo o maior deslocamento dentário total no primeiro pré-molar, seguido do segundo pré-molar e do primeiro molar. Em contraste, o expensor Hyrax obteve maior deslocamento na região posterior da barra anteroposterior (FERNANDES et al., 2021), resultando em maiores alterações intermolares (DORUK et al., 2004; FERNANDES et al. 2021). A diferença entre as regiões alteradas do arco dentário com o uso do EMD e do Hyrax também foi observada em um estudo clínico (ALVES et al., 2020), em que o EMD promoveu maior aumento na região anterior do arco dentário, enquanto o Hyrax promoveu aumentos semelhantes nas regiões de caninos e molares.

O modelo M1 (Figura 11) apresentou maior deslocamento total do segundo pré-molar e do primeiro molar, enquanto em M3, o maior deslocamento ocorreu no primeiro pré-molar e segundo pré-molar. Esses resultados foram semelhantes aos verificados nos estudos clínicos conduzidos por DORUK et al. (2004) e ÇÖREKÇİ e GÖYENÇ (2013), onde a ativação do Hyrax, cuja abertura é semelhante a M1, promoveu maior alteração intermolares, enquanto o expensor tipo leque permitiu maior aumento na região mais anterior do arco dentário, como observado em M3. O deslocamento dentário total no modelo M2 foi mais expressivo em todos os dentes, quando comparado aos demais modelos. Este maior deslocamento observado pode ser atribuído à maior quantidade de abertura dos parafusos realizada em M2.

Ao analisar os deslocamentos dentários vertical e horizontal, bem como a distribuição de tensões nos ligamentos periodontais, observou-se que a inclinação vestibular ocorreu em todos os dentes, concomitante com a intrusão da face vestibular e a extrusão da face palatina. Este padrão de deslocamento também foi constatado em outros estudos (STARNBACH e CLEALL, 1964; STARNBACH et al., 1966; HAAS, 1970; ARAUGIO et al., 2013; FERNANDES et al., 2021; ALVES et al., 2020; MASSARO et al., 2021a). ALVES et al., (2020), em um estudo clínico, observaram a vestibularização dentária com o uso do EMD, assim como ARAUGIO et al. (2013) e FERNANDES et al. (2021) com o uso do Hyrax e MASSARO et al. (2021a) com o expensor tipo leque.

A abertura do EMD em M2 promoveu maior inclinação vestibular dos dentes em comparação aos modelos M1 e M3, reforçando a correlação positiva entre a quantidade de expansão maxilar e inclinação dentária, conforme descrito por BASSARELLI; DALSTRA; MELSEN (2005). Entretanto, a tendência de vestibularização em M2 não pareceu ser proporcional ao deslocamento dentário total, conforme observado com a ativação do Hyrax (FERNANDES et al. 2021), uma vez que o maior deslocamento foi verificado no primeiro pré-molar e as maiores tensões identificadas no ligamento periodontal do primeiro molar. Já em M1, foi possível visualizar esta correlação, em que o primeiro molar apresentou maiores deslocamento dentário total e inclinação vestibular em relação aos demais dentes.

De maneira geral, o modelo M2 proporcionou maior transferência de esforço mecânico à estrutura óssea, maior distribuição de tensão ao longo da dimensão anteroposterior da SPM e, conseqüentemente, maior a expansão maxilar. Em contrapartida, as ativações de ambos os parafusos com sobrecarga anterior também resultaram em maiores deslocamentos dentários e tensões nos ligamentos periodontais. Este efeito desejável de abertura da SPM seguido por um efeito dentário também foi constatado com o uso do Hyrax (BASSARELLI et al., 2005; ARAUGIO et al., 2013; FERNANDES et al., 2021). Logo, estes resultados devem ser considerados durante o processo de ERM.

Além disso, ao considerar que a maior quantidade de ativação do parafuso expensor aumenta a tensão nas estruturas anatômicas (HARTONO et al., 2018; FERNANDES et al., 2021), a compreensão da magnitude e da distribuição das tensões no complexo craniofacial contribui para a prática clínica, uma vez que podem ter efeitos benéficos ou adversos ao paciente (CHACONAS e CAPUTO, 1982). Com este estudo, o direcionamento do padrão de abertura poderá ser realizado de forma mais consciente e segura de acordo com as características da má oclusão, como nos casos de maior constrição na região anterior.

## 7 CONCLUSÃO

- As variações nas ativações dos parafusos anterior e posterior interferiram na localização das concentrações de tensões e no deslocamento da maxila.
- As variações nas ativações dos parafusos anterior e posterior interferiram no deslocamento dentário e na distribuição de tensões nos ligamentos periodontais.
- As ativações em M2 proporcionaram maior tensão principal máxima na SPM.
- As ativações em M2 apresentaram maior eficácia na transferência de esforço mecânico para a maxila, gerando níveis mais altos de tensões na região palatina do processo alveolar entre 1º pré-molar e 2º molar que se propagaram para as regiões de canino, SPM e processo pterigoideo.
- As ativações em M2 geraram maior transferência de carga mecânica sobre os dentes, resultando em maiores deslocamentos dentários e tensões de tração e de compressão nos ligamentos periodontais dos pré-molares e do primeiro molar.
- Em todos os modelos, a expansão maxilar apresentou formato de “V”, com vértice superior e posterior.
- Em todos os modelos, houve tendência de deslocamento coronário em sentido vestibular associado a intrusão da face vestibular e extrusão da face palatina de todos os dentes.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, A. C. M.; GARIB, G. D.; JANSON, G.; MARANHÃO, O. B. V. Expansor maxilar diferencial como uma alternativa clínica para as correções transversais: relato de caso clínico. **Orthod. Sci. Pract.**, v. 10, n. 40, p. 56-64, Jan. 2018.
- ALVES, A. C. M.; JANSON, G.; MCNAMARA JUNIOR, J. A.; LAURIS, J. R. P.; GARIB, D. G. Maxillary expander with differential opening vs hyrax expander: A randomized clinical trial. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 157, n. 1, p. 7-18, Jan. 2020.
- ANDERSEN, K.L.; PEDERSEN, E.H.; MELSEN, B. Material parameters and stress profiles within the periodontal ligament. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 99, n. 5, p. 427-40, May 1991.
- ANGELL, E. H. Treatment of irregularity of the permanent or adult teeth. **Dent. Cosmos**, v. 1, n. 10, p. 540–544, May 1860.
- ARAUGIO, R. M. S.; LANDRE JUNIOR, J.; SILVA, D. L. A.; PACHECO, W.; PITHON, M. M.; OLIVEIRA, D. D. Influence of the expansion screw height on the dental effects of the hyrax expander: A study with finite elements. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 143, n. 2, p. 221-227, Feb. 2013.
- BASSARELLI, T.; DALSTRA, M.; MELSEN, B. Changes in clinical crown height as a result of transverse expansion of the maxilla in adults. **Eur. J. Orthod.**, v. 27, n. 2, p.121-128, Apr. 2005.
- BELLUZZO, R. H. L.; FALTIN JUNIOR, K.; LASCALA, C. E.; VIANNA, L. B. R. Maxillary constriction: Are there differences between anterior and posterior regions. **Dental Press J. Orthod.**, v. 17, n. 4, p. 25-26, July/Aug. 2012.
- BIERDEMAN, W. A hygienic appliance for rapid expansion. **J. Pract. Orthod.**, v. 2, n. 2, p. 67-70, Feb. 1968.
- BISTAFFA, A. G. I.; BELOMO-YAMAGUCHI, L.; CONTI, A. C. C. F.; OLTRAMARI, P. V. P.; ALMEIDA, M. R.; ALMEIDA-PEDRIN, R. R. A.; FERNANDES, T. M. F. Dental arch changes comparison between expander with differential opening, hyrax-type and has-type expanders: A prospective clinical study. **Orthod. Craniofac. Res.**, v. 26, n. 3, p. 468-475, Aug. 2023.
- BOUTON, A; SIMON, Y; GOUSSARD, F; TERESI, L; SANSALONE, V. New finite element study protocol: Clinical simulation of orthodontic tooth movement. **Int. Orthod.**, v. 15, n. 2, p. 165-179, June 2017.
- BRUNETTO, M.; ANDRIANI, J. S. P.; RIBEIRO, G. L. U.; LOCKS, A.; CORREA, M.; CORREA, L. R. Three-dimensional assessment of buccal alveolar bone after rapid and slow maxillary expansion: A clinical trial study. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 143, n. 5, p. 633-644, May 2013.

CHACONAS S. J.; CAPUTO, A. A. Observation of the orthopedic force distribution produced by maxillary orthodontic appliances. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 82, n. 6, p. 492-501, Dec. 1982.

ÇÖREKÇİ, B.; GÖYENÇ, Y. B. Dentofacial changes from fan-type rapid maxillary expansion vs traditional rapid maxillary expansion in early mixed dentition. A prospective clinical trial. **Angle Orthod.**, v. 83, n. 5, p. 842-850, Sept. 2013.

DORUK, C.; BICAKCI, A. A.; BASCIFTCI, F. A.; AGAR, U.; BABACAN, H. A comparison of the effects of rapid maxillary expansion and fan-type rapid maxillary expansion on dentofacial structures. **Angle Orthod.**, v. 74, n. 2, p. 184-194, Apr. 2004.

FERNANDES, L. C.; VITRAL, R. W. F.; NORITOMI, P., Y.; SCHMITBERGER, C. A.; CAMPOS, M. J. S. Influence of the hyrax expander screw position on stress distribution in the maxilla: A study with finite elements. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 155, n. 1, p. 80-87, Jan. 2019.

FERNANDES, L. C.; VITRAL, R. W. F.; NORITOMI, P. Y.; MAXIMIANO, G. S.; CAMPO, M. J. S. Influence of the hyrax expander screw position on displacement and stress distribution in teeth: A study with finite elements. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 160, n.2, p.266-275, Aug. 2021.

FIGUEIREDO, D. S.; BARTOLOMEU, F. U.; ROMUALDO, C. R.; PALOMO, J. M.; HORTA, M. C.; ANDRADE JUNIOR, I; OLIVEIRA, D. D. Dentoskeletal effects of 3 maxillary expanders in patients with clefts: a cone-beam computed tomography study. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 146, n. 1, p. 73-81, July 2014.

GARIB, D., G.; HENRIQUES, J., F., C.; JANSON, G.; FREITAS, M., R.; COELHO, R., A. Rapid maxillary expansion-tooth tissue-borne versus tooth-borne expanders: a computed tomography evaluation of dentoskeletal effects. **Angle Orthod.**, v. 75, n. 4, p. 548-557. July 2005.

GARIB, D. G.; HENRIQUES, J. F. C.; JANSON, G.; FREITAS, M. R.; FERNANDES, A. Y. Periodontal effects of rapid maxillary expansion with tooth-tissue-borne and tooth-borne expanders: A computed tomography evaluation. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 129, n. 7, p. 749-758, June 2006.

GARIB, D. G.; GARCIA, L. C.; PEREIRA, V.; LAURIS, R. C. M. C.; YEN, S. A rapid maxillary expander with differential opening. **J. Clin. Orthop.**, v. 48, n. 7, p. 430-435, July 2014.

GARIB, D. G.; LAURIS, R. C. M., C.; CALIL, L. R.; ALVES, A. C. M.; JANSON, G.; ALMEIDA, A. M.; CEVIDANES, L. H. S.; LAURIS, J. R. P. Dentoskeletal outcomes of a rapid maxillary expander with differential opening in patients with bilateral cleft lip and palate: A prospective clinical trial. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 150, n. 4, p. 564-574, Oct. 2016.

GOMES, O. S.; SERAIDARIAN, P. I.; LANDRE JUNIOR, J.; OLIVEIRA, D. D.; CAVALCANTI, B. N. Tooth displacement due to occlusal contacts: a three-dimensional finite element study. **J. Oral Rehabil.**, v. 33, n. 12, p.874-880, Dec. 2006.

GOPALAKRISHNAN, U.; SRIDHAR, P. Assessment of the dental and skeletal effects of fan-type rapid maxillary expansion screw and hyrax screw on craniofacial structures. **Contemp. Clin. Dent.**, v.8, n. 1, p.64-70, Jan-Mar. 2017.

HAAS, A. J. Rapid expansion of the maxillary dental arch and nasal cavity by opening the midpalatal suture. **Angle Orthod.**, v. 31, n. 2, p. 73-90, Apr. 1961.

HAAS, A. J. Palatal expansion: just the beginning of dentofacial orthopedics. **Am. J. Orthodont.**, v. 57, n. 3, p. 219-255, Mar. 1970.

HAN, U. A.; KIM, Y.; PARK, J. U. Three-dimensional finite element analysis of stress distribution and displacement of the maxilla following surgically assisted rapid maxillary expansion. **J. Craniomaxillofac. Surg.**, v. 37, n. 3, p. 145-154, Apr. 2009.

HARTONO, N.; SOEGIHARTO, B. M.; WIDAYATI, R. The difference of stress distribution of maxillary expansion using rapid maxillary expander (RME) and maxillary skeletal expander (MSE) – a finite element analysis. **Prog. Orthod.**, v. 19, n. 33, p. 1-10, Oct. 2018.

KAYA, N.; SEKER, E. D.; YÜCESOY, T. Comparison of the effects of different rapid maxillary expansion techniques on craniofacial structures: a finite element analysis study. **Prog. Orthod.**, v. 24, n.7, p. 1-11, Mar. 2023.

KNAUP, B.; YILDIZHAN, F.; WEHRBEIN, H. Age-related changes in the midpalatal suture. A histomorphometric study. **J. Orofac. Orthop.**, v.65, n.1, p. 467-474, Nov. 2004.

LAGRAVERE, M. O.; MAJOR, P. W.; FLORES-MIR, C. Long-term dental arch changes after rapid maxillary expansion treatment: a systematic review. **Angle Orthod.**, v.75, n.2, p. 155-161, Mar. 2005.

LAGRAVERE, M. Finite element analysis: is it justifiable. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 159, n. 3, p. 255-256, Mar. 2021.

LEE, H.; TING, K.; NELSON, M.; SUN, N.; SUNG, S.J. Maxillary expansion in customized finite element method models. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 136, n.3, 367-374, Sept. 2009.

LIU, S.; XU, T.; ZOU, W. Effects of rapid maxillary expansion on the midpalatal suture: a systematic review. **Eur. J. Orthod.**, v. 37, n. 6, p. 651-655, Dec. 2015.

LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIERO, E. T.; LANDRE JUNIOR, J. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Rev. Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial.**, v. 11, n. 2, p. 35-43, Apr. 2006.

MASSARO, C.; JANSON, G.; MIRANDA, F.; CASTILLO, A. A.; PUGLIESE, F.; LAURIS, J. R. P.; GARIB, D. Dental arch changes comparison between expander with differential opening and fan-type expander: A randomized controlled trial. **Eur. J. Orthod.**, v. 43, n. 3, p. 265-273, June 2021a.

MASSARO, C.; GARIB, D.; CEVIDANES, L.; JANSON, G.; YATABE, M.; LAURIS, J. R. P.; RUELLAS, A. C. Maxillary dentoskeletal outcomes of the expander with differential opening and the fan-type expander: a randomized controlled trial. **Clin. Oral Investig.**, v. 25, n. 9, p. 5247-5256, Sept. 2021b.

MATSUYAMA, Y.; MOTOYOSHI, M.; TSURUMACHI, N.; SHIMIZU, N. Effects of palate depth, modified arm shape, and anchor screw on rapid maxillary expansion: a finite element analysis. **Eur. J. Orthod.**, v. 37, n. 2, p. 188-193, Apr. 2015.

MORDENTE, C. M.; PALOMO, J. M.; HORTA, M. C. R.; SOUKI, B. Q.; OLIVEIRA, D. D.; ANDRADE JUNIOR, I. Upper airway assessment using four different maxillary expanders in cleft patients: A cone-beam computed tomography study. **Angle Orthod.**, v. 86, n. 4, p. 617-624, July 2016.

PETRÉN, S.; BONDEMARK, L.; SODERFELDT, B. A systematic review concerning early orthodontic treatment of unilateral posterior crossbite. **Angle Orthod.**, v. 73, n. 5, p. 588-596, Oct. 2003.

PROVATIDIS, C. G.; GEORGIOPOULOS, B.; KOTINAS, A.; MCDONALD, J. P. Evaluation of craniofacial effects during rapid maxillary expansion through combined in vivo/in vitro and finite element studies. **Eur. J. Orthod.**, v. 30, n. 5, p. 437-448, Oct. 2008.

PUGLIESE, F.; PALOMO, J. M.; CALIL, L. R.; ALVES, A. M.; LAURIS, J. R. P.; GARIB, D. G. Dental arch size and shape after maxillary expansion in bilateral complete cleft palate: A comparison of three expander designs. **Angle Orthod.**, v. 90, n. 2, p. 233-238, Mar. 2020.

ROMMANYK, D. L.; VAJAEIAN, B.; ADDISON, O.; ADEEB, S. The use of finite element analysis in dentistry and orthodontics: Critical points for model development and interpreting results. **Semin. Orthod.**, v. 26, n. 3, p. 162-17, Sept. 2020.

RUNGCHARASSAENG, K.; CARUSO, J. M.; KAN, J. Y. K.; KIM, J.; TAYLOR, G. Factors affecting buccal bone changes of maxillary posterior teeth after rapid maxillary expansion. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 132, n. 4, p. 428e1-428e8, Oct. 2007.

SERPE, L.C.T.; TORRES, L.A.G.; PINTO, R.U.F., TOYOFUKU, A.C.M.M., LAS CASAS, E.B. Maxillary biomechanical study during rapid expansion treatment with simplified model. **J. Med. Imaging Health Inform.**, v.4, n.1, p.137-41, March 2014.

SERPE, L.C.; LAS CASAS, E.B.; TOYOFUKU, A.C.; GONZALEZ-TORRES, L.A. A bilinear elastic constitutive model applied for midpalatal suture behavior during rapid maxillary expansion. **Res. Biomed. Eng.**, v. 31, n.4, p. 319-127. Oct-Dec. 2015.

SILVA FILHO, O. G. Rapid maxillary expansion in the primary and mixed dentitions: A cephalometric evaluation. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 100, n. 2, p. 171-181, Aug. 1991.

SÖKÜCÜ, O.; DORUK, C.; UYSAL, Ö. I. Comparison of the effects of RME and fan-type RME on nasal airway by using acoustic rhinometry. **Angle Orthod.**, v. 80, n. 5, p. 870-875, Sept. 2010.

STARNBACH, H. K.; CLEALL, J. F. The effects of splitting the midpalatal suture on the surrounding structures. **Am. J. Orthod.**, v. 50, n. 12, p. 923-924, Dec. 1964.

STARNBACH, H.; BAYNE, D.; CLEALL, J.; SUBTENLY, J. D. Facioskeletal and dental changes resulting from rapid maxillary expansion. **Angle Orthod.**, v. 36, n.2, p. 136-64, Apr. 1966.

TANNE, K.; HIRAGA, J.; SAKUDA, M. Effects of directions of maxillary protraction forces on biomechanical changes in craniofacial complex. **Eur. J. Orthod.**, v. 11, n. 4, p. 382-391, Sept/Oct. 1989.

TEIXEIRA, R.; MASSARO, C.; GARIB, D. Comparison of nasal cavity changes between the expander with differential opening and the fan-type expander: a secondary data analysis from a RCT. **Clin. Oral Investig.**, v. 27, n. 10, p. 5999-6006, Oct. 2023a.

TEIXEIRA, R.; MASSARO, C.; GARIB, D. Vertical and sagittal changes produced by a expander with differential opening and fan-type expander: A post-hoc analysis of a randomised controlled trial. **J. Orthod.**, Oct. 2023b. Disponível em: <http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37905906/>. Acesso em: 22 May 2024.

TIMMS, D. J. A study of basal movement with rapid maxillary expansion. **Am. J. Orthod.**, v. 77, n. 5, p. 500-507, May 1980.

TOKLU, M. G.; GERMEC-CAKAN, D.; TOZLU, M. Periodontal, dentoalveolar and skeletal effects of tooth-borne and tooth-bone-borne expansion appliances. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.**, v. 148, n. 1, p. 97-109, July 2015.

## ANEXO A – Submissão do artigo científico

| <div>  American Journal of Orthodontics &amp; Dentofacial Orthopedics         </div> <div>           Gustavo Maximiano   Logout         </div> |                    |                                                                                                                                                              |                       |             |                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------------------------|
| <div> <a href="#">Home</a> <a href="#">Main Menu</a> <a href="#">Submit a Manuscript</a> <a href="#">About</a> <a href="#">Help</a> </div>                                                                                      |                    |                                                                                                                                                              |                       |             |                               |
| <div> <a href="#">← Revisions Being Processed for Author</a> </div>                                                                                                                                                             |                    |                                                                                                                                                              |                       |             |                               |
| <div>           Page: 1 of 1 (1 total revisions being processed)           Results per page: 10         </div>                                                                                                                  |                    |                                                                                                                                                              |                       |             |                               |
| Action                                                                                                                                                                                                                          | Manuscript Number  | Title                                                                                                                                                        | Date Submission Began | Status Date | Current Status                |
| <a href="#">Action Links</a>                                                                                                                                                                                                    | AJODO-D-24-00592R1 | Study of stress distribution in the maxilla resulting from the use of a rapid maxillary expander with differential opening through the finite element method | 10/25/2024            | 10/25/2024  | Revision Submitted to Journal |
| <div>           Page: 1 of 1 (1 total revisions being processed)           Results per page: 10         </div>                                                                                                                  |                    |                                                                                                                                                              |                       |             |                               |

### American Journal of Orthodontics & Dentofacial Orthopedics

#### Study of stress distribution in the maxilla resulting from the use of a rapid maxillary expander with differential opening through the finite element method

--Manuscript Draft--

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Manuscript Number:    | AJODO-D-24-00592R1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Article Type:         | Original Article                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Keywords:             | maxillary expansion; Differential opening expander; Finite element analysis.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Corresponding Author: | Gustavo Silva Maximiano<br>Universidade Federal de Juiz de Fora<br>BRAZIL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| First Author:         | Aline Rezende Zaiter                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Order of Authors:     | Aline Rezende Zaiter<br>Gustavo Silva Maximiano<br>Leandra Coimbra de Almeida<br>Marcio José da Silva Campos<br>Pedro Yoshito Noritomi<br>Robert Willer Farinazzo Vitral                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Abstract:             | <p>Introduction: This study aimed to evaluate the patterns of stress distribution and displacements in the maxillary structure from the simulation of screw activations of the Rapid Maxillary Expander with Differential Opening (EDO), using the finite element method (FEM). Methods: Part of the maxilla with the teeth of an upper hemiarch, the midpalatal suture (MPS) and the EDO were modeled. Three models were simulated with different activations in the anterior and posterior screws. In M1, a 0.25mm activation was simulated in both the anterior screw and the posterior screw. In M2, an opening of 0.5mm in the anterior region and 0.25mm in the posterior region was simulated. And in M3, a 0.25mm activation was simulated only in the anterior screw. The stress distributions in the maxilla were recorded in each of the models. Results: All simulated models showed a MPS opening with the vertex in a superior and posterior position. The area of stress concentration in the maxilla was located in the middle region of the palate with subsequent dissipation toward the anterior region and the pterygoid process. The M2 model had the greatest stress distribution in the maxillary structure and MPS. Conclusions: The activations of the anterior and/or posterior screws of the EDO interfered with the distribution and intensity of stresses in the maxilla. By activating both screws with anterior overload, there was a greater mechanical effect of the device on the bone structure.</p> |

## ANEXO B – Artigo em Português

### **Estudo da distribuição de tensões na maxila resultante do uso do expansor maxilar diferencial através do método de elementos finitos**

#### **RESUMO**

**Introdução:** Este estudo teve o objetivo de avaliar os padrões de distribuição de tensões e deslocamentos na estrutura maxilar a partir da simulação de ativações dos parafusos do aparelho expansor maxilar diferencial (EMD), utilizando o método de elementos finitos (MEF). **Métodos:** Parte da maxila com os dentes de um hemiarco superior, a sutura palatina mediana (SPM) e o aparelho EMD foram modelados. Três modelos foram simulados com diferentes ativações nos parafusos anterior e posterior. No modelo M1, uma ativação de 0,25mm foi simulada no parafuso anterior e no parafuso posterior. Em M2, foi simulada uma abertura de 0,5mm na região anterior e 0,25mm na região posterior. E no modelo M3, uma ativação de 0,25mm foi simulada apenas no parafuso anterior. Em cada modelo simulado, as distribuições de tensões na maxila foram registradas. **Resultados:** Todos os modelos simulados apresentaram abertura da SPM com vértice em posição superior e posterior, bem como a área de concentração de tensão na maxila ficou localizada em região média de palato com subsequente dissipação em direção anterior e ao processo pterigoide. O modelo M2 obteve maior distribuição de tensão na estrutura maxilar e SPM. **Conclusões:** As ativações dos parafusos anterior e/ou posterior do EMD interferiram na distribuição e na intensidade de tensões na maxila. Ao ativar ambos os parafusos com sobrecarga anterior, houve maior efeito mecânico do aparelho para a estrutura óssea.

**Palavras-Chave:** Expansão maxilar; Expansor maxilar diferencial; Análise de elementos finitos.

## INTRODUÇÃO

A deficiência transversal da maxila é uma alteração esquelética comum na infância<sup>1,2</sup>, caracterizada por uma maxila de aspecto triangular, palato profundo e ogival, além de um estreitamento dos segmentos posteriores do arco dentário superior<sup>3,4</sup>, comumente associada à mordida cruzada posterior<sup>5-7</sup>. A expansão rápida da maxila (ERM) é o procedimento ortopédico de escolha para tratar a deficiência maxilar<sup>8-15</sup>.

A expansão maxilar pode ser realizada por aparelhos expansores com diferentes desenhos<sup>9,16,17</sup>. Os expansores dos tipos Haas e hyrax promovem aumentos semelhantes nas distâncias intercaninos e intermolares<sup>14,18</sup>. Nos casos de constrição maxilar restrita à região de caninos e primeiros molares decíduos, com relação transversal adequada na região dos primeiros molares permanentes e segundos molares decíduos, o expansor modificado tipo leque se torna indicado<sup>2,6,16,19</sup>. Quando a mordida cruzada está localizada tanto na região anterior quanto posterior do arco dentário, com maior constrição na região de caninos, o EMD pode ser indicado<sup>14,17,20</sup>.

O EMD, proposto por GARIB et al. (2014)<sup>17</sup>, é constituído por dois parafusos que possibilitam diferentes quantidades de expansão nas regiões anterior e posterior do arco dentário. Esta expansão diferenciada minimiza os efeitos indesejados da ERM, como a expansão excessiva na região de molares e os danos periodontais aos dentes ancorados<sup>13,14,17,20</sup>.

Sendo o MEF uma técnica computacional que permite definir os estados de tensão e deformação de uma estrutura submetida a forças simuladas<sup>10,12,21-22</sup>, o mesmo pode ser considerado um instrumento para um maior entendimento do processo de expansão maxilar que ocorre com o uso do EMD, uma vez que a ausência de análise das distribuições da tensão nas estruturas esqueléticas durante o uso do aparelho pode ser um fator limitante para decisões clínicas<sup>2,14</sup>.

O objetivo deste estudo foi analisar, por meio do MEF, os padrões de distribuição de tensão e deslocamento na estrutura maxilar através de simulações das ativações dos parafusos anterior e posterior do EMD.

## MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do modelo empregado na aplicação do MEF foi realizado no Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI – Campinas, São Paulo,

Brasil). Partindo de um modelo anatômico desenvolvido por tecnologia BioCAD, os seguintes componentes anatômicos da maxila foram determinados: ossos trabecular e cortical, elementos dentários (incisivo central, incisivo lateral, canino, primeiro pré-molar, segundo pré-molar, primeiro molar e segundo molar) (Figura 1A), ligamento periodontal (Figura 1B), base do crânio (ossos frontais, zigomático, nasal e esfenóide) e unidade funcional osso-sutura, representando a SPM. Este modelo apresentou características de um paciente adulto, sem evidências de assimetrias, reabilitação protética e alterações craniofaciais, congênita ou adquiridas.

O EMD foi modelado através do software Rhinoceros 7® (Robert McNeel & Associates, Seattle, USA), seguindo as formas e dimensões do dispositivo físico. Este dispositivo foi constituído por uma barra de aço anteroposterior com dimensões 17,4mm x 4,4mm x 3,8mm, apresentando dois orifícios de passagem para os parafusos expansores de 2,2mm de diâmetro e um orifício mediano de menor diâmetro referente à passagem de uma barra estabilizadora (Figura 2A). Foram inseridos dois braços conectores (anterior e posterior) de diâmetro igual a 1,5mm que proporcionaram a união da barra de aço anteroposterior a um outro segmento de fio de menor diâmetro (0,5mm). Este, por sua vez, tangenciou a face palatina das coroas do primeiro pré-molar, segundo pré-molar, primeiro molar e segundo molar, sendo que o primeiro pré-molar e o primeiro molar apresentaram bandas de união fio-dente com altura de 4mm e espessura de 0,2mm (Figura 2B).

O EMD foi incorporado sobre o palato do modelo geométrico com o orifício referente ao parafuso anterior posicionado em direção ao ponto de contato entre os pré-molares, enquanto o orifício referente ao parafuso posterior foi direcionado ao centro da face palatina do primeiro molar (Figura 2C). Em direção vertical, o dispositivo foi alocado a 15mm acima do plano oclusal (Figura 2B), como estabelecido por FERNANDES et al. (2019)<sup>12</sup> e FERNANDES et al. (2021)<sup>23</sup>.

Os modelos finalizados foram exportados para o software Hypermesh 2021 (Altair Engineering, Michigan, USA) para a criação de uma malha tridimensional de elementos finitos tetraédricos (Figuras 3A e 3B). Nas simulações com elementos finitos, foram considerados espessura óssea de 2mm e elementos em barras unidimensionais com propriedades elásticas para representar a SPM (Figura 3C). As estruturas do modelo foram identificadas com propriedades específicas de cada material, determinado por Coeficiente de Poisson e Módulo de Young (Tabela I), com características elásticas, isotrópicas, lineares e homogêneas.

Três simulações distintas de ativações do EMD foram realizadas através do MEF. Em todas as simulações, os parafusos anterior e posterior foram posicionados no sentido transversal, centralizados no palato do modelo e paralelos ao plano oclusal.

No modelo M1, ativações de 0,25mm foram simuladas em ambos os parafusos anterior e posterior. No modelo M2, uma ativação de 0,25mm foi adicionada apenas no parafuso anterior, totalizando uma abertura de 0,5mm na região anterior e 0,25mm na região posterior. E no modelo M3, apenas o parafuso anterior do dispositivo foi ativado 0,25mm (Tabela II).

Uma condição de contorno rígida aplicada às partes superior e posterior do osso maxilar foi definida para a análise da distribuição de tensão e de deslocamento na estrutura, a fim de restringir movimentos vertical, anteroposterior e transversal do modelo. As ativações do dispositivo EMD foram realizadas por meio de um deslocamento forçado na direção de expansão maxilar, cuja aplicação esteve presente na região central dos parafusos anterior e posterior.

Na região de SPM, uma condição de simetria matemática foi desenvolvida e a carga aplicada foi recriada simetricamente no lado oposto para a obtenção de resultados equivalentes em ambos os hemiarcos. Foi simulado 0,25mm no centro do parafuso e, considerando a simetria, a ativação do EMD apresentou equivalência a 0,5mm em cada ativação dos parafusos anterior e posterior.

## RESULTADOS

Ao analisar o deslocamento transversal da maxila, após simular as aberturas dos parafusos do EMD, todos os modelos apresentaram expansão em formato de “V”, com vértice superior e posterior, com maior abertura das regiões alveolar em vista coronal (Figura 4A) e anterior da maxila em vista axial (Figura 4B). O modelo M2 apresentou o maior deslocamento na região anterior da maxila e no modelo M3 foi observado menor deslocamento.

Na avaliação da distribuição de tensão na maxila em vistas sagital (Figura 5A) e axial (Figura 5B), a tensão no modelo M1 concentrou-se na região mais posterior do processo alveolar, entre o segundo pré-molar e segundo molar, com tensão máxima de 4,75MPa na região palatina (Figura 5A). A tensão desviou-se da região de SPM, dissipando-se em direções anterior (região de canino) e posterior (processo pterigóideo), apresentando maior intensidade da dissipação para a região posterior (Figuras 5A e 5B). Uma pequena área na região disto-vestibular de crista óssea

alveolar do segundo pré-molar e do primeiro molar apresentou valor máximo de tensão de tração (9,50MPa), indicando tendência de rotação disto-vestibular destes dentes (Figura 5B).

O modelo M3 apresentou concentração de tensão de tração em região mais anterior em relação a M1, entre canino e primeiro molar (Figuras 5A e 5B), com valor aproximado de 4,75MPa na superfície palatina do processo alveolar. Uma tensão de 2,37MPa foi verificada no centro da SPM (Figura 5A) e tensão máxima de 9,50MPa foi observada na crista alveolar disto-vestibular do primeiro pré-molar, segundo pré-molar e primeiro molar, bem como nas regiões de furcas do primeiro pré-molar e do primeiro molar.

No modelo M2, foi possível observar que as tensões se concentraram em uma maior área da região palatina do processo alveolar, entre o canino e o segundo molar, cujo valor máximo de 9,50MPa foi identificado na crista óssea disto-vestibular do primeiro pré-molar, segundo pré-molar, primeiro molar e segundo molar, bem como nas regiões de furca do primeiro pré-molar e primeiro molar (Figura 5B). Houve um aumento da intensidade de tensão de tração distribuída em direção às regiões anterior da maxila, processo pterigóideo (Figura 5B) e de SPM em relação aos modelos M1 e M3 (Figura 5A). O modelo M2 apresentou semelhança com M1 na parte posterior e com M3 na parte anterior da maxila.

Em perspectiva coronal (Figura 5C), tensão de tração foi verificada na região nasal dos modelos M1, M2 e M3, cuja maior área e intensidade foi identificada em M2. O mesmo ocorreu na superfície vestibular do processo alveolar, apresentando maior área de distribuição de tensão na região.

Na análise da distribuição de tensão na SPM em vistas coronal (Figura 6A) e sagital (Figuras 6B), a tensão de compressão, representada por valores negativos na escala, foi identificada na região superior enquanto a tensão de tração, identificada por valores positivos, foi visualizada nas regiões média e ântero-inferior da maxila em todos os modelos (Figura 6B), corroborando com a expansão da maxila em forma de “V”, observado no deslocamento maxilar (Figura 4).

Níveis mais baixos de tensão de tração foram identificados na SPM de M3, associando-se com o menor deslocamento da maxila. Em M2, maiores níveis de tensão de tração foram verificados nas regiões média e inferior da SPM, enquanto em M1 houve uma distribuição mais homogênea das tensões.

## DISCUSSÃO

O uso do MEF na Ortodontia é uma importante ferramenta de pesquisa de abordagem numérica para avaliações biomecânicas difíceis de serem realizadas clinicamente<sup>22,28,29</sup>. A análise com MEF deve ser realizada quando existirem questões relevantes que não puderam ser respondidas em estudos clínicos e que apresentem potencial para a melhoria de produtos específicos e para o esclarecimento de problemas relacionados aos tratamentos existentes<sup>30,31</sup>. O EMD é um aparelho relativamente novo<sup>17</sup>. Massaro et al. (2021)<sup>14</sup> em um estudo clínico que comparou o EMD com o expansor tipo leque, ressaltaram que investigações por meio do MEF sobre o tratamento com EMD seriam necessárias para esclarecer quais os pontos de maior concentração de tensões durante o processo da expansão maxilar. No presente estudo, foi identificado que as regiões de maior concentração de tensões foram na crista óssea distovestibular do primeiro pré-molar ao segundo molar.

Para o melhor entendimento sobre a ERM, o MEF viabiliza analisar a capacidade dos aparelhos em aplicar cargas transversais ideais à maxila, através de simulações em modelos computacionais<sup>12,23,30</sup>. MASSARO et al., (2021)<sup>2</sup> destacaram a importância da análise de distribuição de tensão através do MEF para um maior entendimento no processo de expansão maxilar com o uso do EMD.

Estudos empregaram o MEF para as análises das distribuições de tensões e de deslocamento na maxila<sup>12</sup> e nos dentes<sup>14</sup> durante a ERM com o uso do dispositivo hyrax, ao simular diferentes posições do parafuso expansor nas direções vertical e anteroposterior no palato. FERNANDES et al. (2019)<sup>12</sup> concluíram que a posição mais oclusal e anterior do parafuso expansor apresentou maior eficácia na transferência de tensão na estrutura óssea. Esta mesma posição também promoveu maior esforço mecânico do dispositivo transferido aos dentes e, conseqüentemente, maior deslocamento dentário no estudo de FERNANDES et al. (2021)<sup>14</sup>. A fim de determinar a posição do EMD no palato, o presente estudo baseou-se nestes resultados obtidos por FERNANDES et al. (2019)<sup>12</sup> e FERNANDES et al. (2021)<sup>14</sup>.

Para a realização das simulações do EMD durante as ativações dos parafusos, considerou-se que o comportamento das diferentes estruturas do modelo seria determinado independentemente da idade do paciente, apresentando propriedades específicas como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, assim como foi abordado em outros estudos<sup>12,23,24,27</sup>. A resistência gerada pelas suturas zigomaticomaxilares como resposta do complexo craniofacial às forças de expansão

foi considerada por meio de uma condição de contorno rígida aplicada às partes superior e posterior do osso maxilar.

Ao analisar os modelos, verificou-se que o EMD, em M2, apresentou maior transferência de esforço mecânico para a maxila, gerando níveis mais altos de tensões na região palatina do processo alveolar, entre o primeiro pré-molar e segundo molar, que se propagaram para as regiões de canino, SPM e processo pterigoideo. O processo pterigoideo é uma estrutura óssea conhecida por concentrar tensão durante a expansão maxilar e, conseqüentemente, resistir à abertura transversal<sup>1,12,32</sup>. Ao utilizar o hyrax na ERM, FERNANDES et al. (2019)<sup>12</sup> observaram que a tensão na maxila foi dissipada da região anterior do palato, próximo ao forame incisivo e incisivos centrais, em direção às regiões posterior e lateral da maxila.

LIU et al. (2015) salientaram que a concentração de tensão na região anterior da maxila nas primeiras etapas de ativação do parafuso expensor é considerado um fator contribuinte para a abertura inicial da SPM. Todavia, este fator não foi corroborado nos modelos do presente estudo com as ativações dos parafusos do EMD, uma vez que o dispositivo promoveu abertura da SPM com maiores concentrações de tensão localizados na região palatina do processo alveolar. Uma possível justificativa para a abertura inicial da SPM com a área de concentração de tensões localizada nesta região seria a presença dos parafusos expansores anterior e posterior do EMD em regiões distintas sobre o palato, resultando em uma maior tensão distribuída ao longo da SPM e, conseqüentemente, promovendo sua abertura.

O padrão de abertura piramidal da SPM encontrado em M1, M2 e M3 (Figuras 6A e 6B) pode estar associado aos diferentes níveis de resistências presentes ao longo do comprimento da SPM, bem como com a presença do processo pterigoideo articulado posteriormente à maxila, o que limita a ERM nesta região<sup>1,12,32</sup>. Esse padrão de abertura em forma de V, foi relatado em diversos estudos<sup>12,15,23,24,32,33</sup>, porém dependendo do design do aparelho, isto pode ocorrer em graus diferentes. No presente estudo a divergência da abertura no plano horizontal apresentou uma configuração trapezoidal na simulação em M2 e triangular na simulação em M3.

Neste estudo, o modelo M2 demonstrou maior abertura da SPM em relação a M1 e M3, devido às ativações dos parafusos nas regiões anterior e posterior do palato com sobrecarga anterior. Esta maior quantidade de ativação no parafuso anterior possibilitou aumento na transferência de tensão na região anterior da SPM, diferenciando-se de M1. Ao mesmo tempo, a abertura do parafuso na região posterior

do palato promoveu redução de resistência na região posterior da maxila, diferenciando-se de M3 e, conseqüentemente, viabilizando maior abertura ao longo da SPM.

Em ensaios clínicos randomizados, ALVES et al. (2020)<sup>13</sup>, ao avaliarem os efeitos dos aparelhos EMD e hyrax, concluíram que o EMD promoveu maiores aumentos da distância intercaninos e da abertura da SPM e maior efeito ortopédico em relação ao expansor hyrax, devido à maior quantidade de ativação do parafuso expansor na região anterior do palato. MASSARO et al. (2021)<sup>2</sup> também observaram que o EMD proporcionou um maior diastema interincisivo em relação ao expansor tipo leque, devido à ativação do parafuso posterior do EMD, já que ambos os dispositivos comumente concentram a maior abertura do parafuso na região anterior do palato. No modelo M2 do presente estudo, é possível verificar que a abertura do aparelho de forma trapezoidal possibilitou maior transferência de esforço mecânico do EMD para o osso maxilar, bem como para a SPM, o que explica o maior deslocamento transversal da maxila durante a ERM.

O aumento na largura da cavidade nasal também é considerado um dos efeitos da ERM<sup>7,34</sup>. Neste estudo, o modelo M2 resultou em uma maior área de tensão máxima na região nasal (Figuras 5A e 5C). O maior aumento da cavidade nasal com as ativações de ambos os parafusos expansores com sobrecarga anterior do EMD também foi observada em ensaios clínicos randomizados<sup>14,34</sup>. TEIXEIRA et al. (2023)<sup>34</sup>, ao compararem as alterações na região nasal entre o EMD e o tipo leque através da análise com tomografia computadorizada de feixe cônico, constataram que o EMD promoveu maior aumento transversal nas regiões anterior e posterior do terço inferior da cavidade nasal. Assim como MASSARO et al. (2021)<sup>14</sup>, que observaram maior expansão da cavidade nasal após o uso do EMD em comparação ao expansor tipo leque.

O modelo M3 (Figura 5B e 5C) apresentou uma menor concentração de tensão na região nasal em relação a M1 e M2 (Figura 6B), apesar de a abertura ter ocorrido no parafuso anterior do dispositivo. Do mesmo modo, o expansor tipo leque, cuja ativação ocorre na região anterior do palato, produziu menor ganho transversal da cavidade nasal em comparação com o hyrax<sup>6,16</sup> e com a abertura trapezoidal do EMD<sup>14,34</sup>.

Com a abertura em M2, uma expansão diferenciada da maxila foi alcançada, havendo distribuição de tensão ao longo da dimensão anteroposterior da SPM. As ativações dos parafusos anterior e posterior com sobrecarga anterior resultaram em

maior transferência de esforço mecânico à estrutura óssea, promovendo maiores áreas com altas concentrações de tensões. A partir desses resultados, o direcionamento do padrão de abertura poderá ser realizado de forma mais consciente e segura de acordo com as características da má oclusão, como nos casos de maior constrição na região anterior. Tanto o EMD quanto o expansor em leque podem ser usados para tratar essas situações clínicas de maior constrição na região de caninos, porém, quando é necessário, também, um aumento da distância intermolar, o EMD possibilita o controle entre a abertura posterior e anterior<sup>14</sup>. Considerando que uma maior quantidade de ativação do parafuso expansor aumenta a tensão nas estruturas anatômicas<sup>11</sup>, a compreensão de sua magnitude e distribuição no complexo craniofacial contribui para a prática clínica, uma vez que essas tensões podem ter efeitos benéficos ou adversos ao paciente<sup>1</sup>.

## CONCLUSÕES

- Houve expansão em formato de “V” na maxila, com vértice superior e posterior, nos modelos M1, M2 e M3.
- As variações nas ativações dos parafusos anterior e posterior interferiram na localização das concentrações de tensões na maxila, bem como no seu deslocamento.
- As ativações em M2 proporcionaram maior tensão principal máxima na SPM e nas demais regiões da estrutura maxilar.
- As ativações em M2 apresentaram maior eficácia na transferência de esforço mecânico para a maxila, gerando níveis mais altos de tensões na região palatina do processo alveolar entre 1º pré-molar e 2º molar que se propagaram para as regiões de canino, SPM e processo pterigoideo.

## REFERÊNCIAS

- 1 Chaconas SJ, Caputo AA. Observation of the orthopedic force distribution produced by maxillary orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial* 1982;82:492-501.
- 2 Massaro C, Janson G, Miranda F, Castillo AA, Pugliese F, Lauris JRP, Garib D. Dental arch changes comparison between expander with differential opening and fan-type expander: a randomized controlled trial. *Eur J Orthod* 2021;43:265-273.
- 3 Haas AJ. Rapid expansion of the maxillary dental arch and nasal cavity by opening the midpalatal suture. *Angle Orthod* 1961;31:73-90.

- 4 Haas AJ. Palatal expansion: just the beginning of dentofacial orthopedics. *Am J Orthodont* 1970;57:219-255.
- 5 Silva Filho OG. Rapid maxillary expansion in the primary and mixed dentitions: a cephalometric evaluation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991;100:171-181.
- 6 Çörekçi B, Göyenç YB. Dentofacial changes from fan-type rapid maxillary expansion vs traditional rapid maxillary expansion in early mixed dentition. a prospective clinical trial. *Angle Orthod* 2013;83:842-850.
- 7 Gopalakrishnan U, Sridhar P. Assessment of the dental and skeletal effects of fan-type rapid maxillary expansion screw and hyrax screw on craniofacial structures. *Contemp Clin Dent* 2017;8:64-70.
- 8 Angell EH. Treatment of irregularity of the permanent or adult teeth. *Dent Cosmos* 1860;1:540–544.
- 9 Garib DG, Henriques JFC, Janson G, Freitas MR, Coelho RA. Rapid maxillary expansion-tooth tissue-borne versus tooth-borne expanders: a computed tomography evaluation of dentoskeletal effects. *Angle Orthod* 2005;75:548-557.
- 10 Liu S, Xu T, Zou W. Effects of rapid maxillary expansion on the midpalatal suture: a systematic review. *Eur J Orthod* 2015;37:651-655.
- 11 Hartono N, Soegiharto BM, Widayati R. The difference of stress distribution of maxillary expansion using rapid maxillary expander (RME) and maxillary skeletal expander (MSE) – a finite element analysis. *Prog Orthod* 2018;19:1-10.
- 12 Fernandes LC, Vitral RWF, Noritomi PY, Schmitberger CA, Campos MJS. Influence of the hyrax expander screw position on stress distribution in the maxilla: a study with finite elements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2019;155:80-87.
- 13 Alves ACM, Janson G, Mcnamara Junior JA, Lauris JRP, Garib DG. Maxillary expander with differential opening vs hyrax expander: a randomized clinical trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2020;157:7-18.
- 14 Massaro C, Garib D, Cevidanes L, Janson G, Yatabe M, Lauris JRP, Ruellas AC. Maxillary dentoskeletal outcomes of the expander with differential opening and the fan-type expander: a randomized controlled trial. *Clin Oral Investig* 2021;25:5247-5256.
- 15 Bistaffa AGI, Belomo-Yamaguchi L, Conti ACCF, Oltramari PVP, Almeida MR, Almeida-Pedrin RRA, Fernandes TMF. Dental arch changes comparison between expander with differential opening, hyrax-type and has-type expanders: a prospective clinical study. *Orthod Craniofac Res* 2023;26:468-475.
- 16 Doruk C, Bicakci AA, Basciftci FA, Agar U, Babacan H. A comparison of the effects of rapid maxillary expansion and fan-type rapid maxillary expansion on dentofacial structures. *Angle Orthod* 2004;74:184-194.

- 17 Garib DG, Garcia LC, Pereira V, Lauris RCMC, Yen S. A rapid maxillary expander with differential opening. *J Clin Orthop* 2014;48:430-435.
- 18 Pugliese F, Palomo JM, Calil LR, Alves AM, Lauris JRP, Garib DG. Dental arch size and shape after maxillary expansion in bilateral complete cleft palate: a comparison of three expander designs. *Angle Orthod* 2020;90:233-238.
- 19 Teixeira R, Massaro C, Garib D. Vertical and sagittal changes produced by na expander with differential opening and fan-type expander: a post-hoc analysis of a randomised controlled trial. *J Orthod* 2023. Available at: <http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37905906/>. Last accessed on May 22nd, 2024.
- 20 Alves ACM, Garib GD, Janson G, Maranhão OBV. Expansor maxilar diferencial como uma alternativa clínica para as correções transversais: relato de caso clínico. *Orthod Sci Pract* 2017;10:56-64.
- 21 Lee H, Ting K, Nelson M, Sun N, Sung SJ. Maxillary expansion in customized finite element method models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;136:367-374.
- 22 Bouton A, Simon Y, Goussard F, Teresi L, Sansalone V. New finite element study protocol: clinical simulation of orthodontic tooth movement. *Int Orthod* 2017;15:165-179.
- 23 Fernandes LC, Vitral RWF, Noritomi PY, Maximiano GS, Campo MJS. Influence of the hyrax expander screw position on displacement and stress distribution in teeth: a study with finite elements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2021;160:266-275.
- 24 Serpe LCT, Las Casas EB, Tovofuku ACMM, Gonzalez-Torres LA. A bilinear elastic constitutive model applied for midpalatal suture behavior during rapid maxillary expansion. *Res Biomed Eng* 2015;31:319-127.
- 25 Serpe LCT, Torres LA, Pinto RUF, Toyofuku ACMM, Las Casas EB. Maxillary biomechanical study during rapid expansion treatment with simplified model. *J Med Imaging Health Inform* 2014;4:137-141.
- 26 Andersen KL, Pedersen EH, Melsen B. Material parameters and stress profiles within the periodontal ligament. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991;99:427-440.
- 27 Tanne K, Hiraga J, Sakuda M. Effects of directions of maxillary protraction forces on biomechanical changes in craniofacial complex. *Eur J Orthod* 1989;11:382-391.
- 28 Rommanyk DL, Vajaeian B, Addison O, Adeeb S. The use of finite element analysis in dentistry and orthodontics: critical points for model development and interpreting results. *Semin Orthod* 2020;26:162-173.
- 29 Kaya N, Seker ED, Yücesoy T. Comparison of the effects of diferente rapid maxillary expansion techniques on craniofacial structures: a finite elemento analysis study. *Prog Orthod* 2023;24:1-11.

- 30 Araugio RMS, Landre Junior J, Silva DLA, Pacheco W, Pithon MM, Oliveira DD. Influence of the expansion screw height on the dental effects of the hyrax expander: a study with finite elements. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2013;143:221-227.
- 31 LAGRAVERE, M. Finite element analysis: is it justifiable. Am J Orthod Dentofacial Orthop, v. 159, n. 3, p. 255-256, Mar. 2021.
- 32 Matsuyama Y, Motoyoshi M, Tsurumachi N, Shimizu N. Effects of palate depth, modified arm shape, and anchor screw on rapid maxillary expansion: a finite element analysis. Eur J Orthod 2015;37:188-193.
- 33 Provatidis CG, Georgiopoulos B, Kotinas A, McDonald JP. Evaluation of craniofacial effects during rapid maxillary expansion through combined in vivo/in vitro and finite element studies. Eur J Orthod 2008;30:437-448.
- 34 Teixeira R, Massaro C, Garib D. Comparison of nasal cavity changes between the expander with differential opening and the fan-type expander: a secondary data analysis from a RCT. Clin Oral Investig 2023;27:5999-6006.

## TABELAS

**Tabela I** – Propriedades mecânicas atribuídas às estruturas do modelo geométrico

| Material                            | Coeficiente de Poisson | Módulo de Young (MPa) |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Osso cortical <sup>24</sup>         | 0,30                   | 13700                 |
| Osso trabecular <sup>24</sup>       | 0,30                   | 1370                  |
| Dente <sup>25</sup>                 | 0,30                   | 20000                 |
| Ligamento Periodontal <sup>26</sup> | 0,49                   | 0,69                  |
| Aparelho EMD (aço) <sup>27</sup>    | 0,33                   | 200000                |
| SPM <sup>27</sup>                   | 0,49                   | 1                     |

**Tabela II** – Modelos de elementos finitos em relação à variação de abertura do EMD

| Aberturas dos parafusos | Expansor Maxilar Diferencial |                    |
|-------------------------|------------------------------|--------------------|
|                         | Parafuso Anterior            | Parafuso Posterior |
| M1                      | 0,25mm                       | 0,25mm             |
| M2                      | 0,50mm                       | 0,25mm             |
| M3                      | 0,25mm                       | Sem ativação       |

## LEGENDAS DAS FIGURAS

**Figura 1.** (A) Modelo da maxila e componentes anatômicos: coroa dentária (cor branca), osso cortical (cor rosa), osso trabecular (cor vermelha) (B) Ligamento periodontal (cor vermelha).

**Figura 2.** (A) Desenho esquemático do expansor maxilar diferencial  
Dispositivo EMD posicionado no palato em vistas sagital (B) e axial (C).

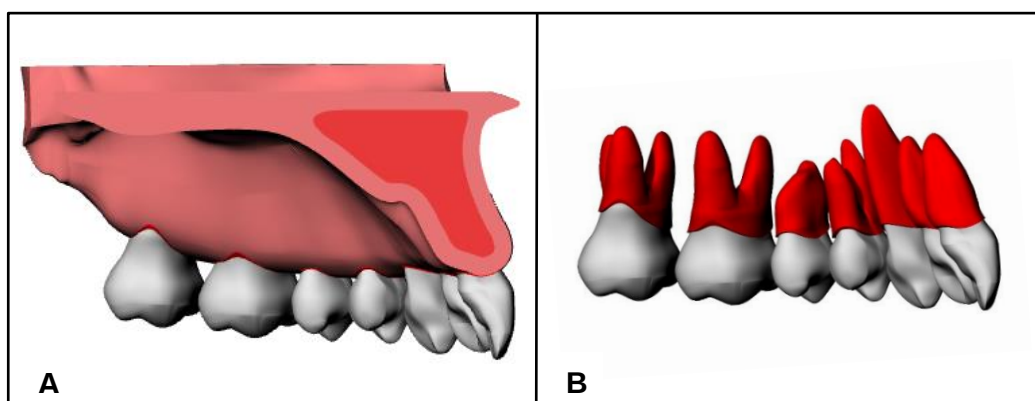
**Figura 3.** (A) Modelo em elementos finitos, composto por elementos tetraédricos. (B) Região de refinamento da malha, evidenciando a diferença de tamanhos de elementos. (C) Elementos em barra 1D, usados para representar a SPM (cor verde).

**Figura 4.** Deslocamento (em milímetros) da maxila em plano coronal (A) e em plano axial (B).

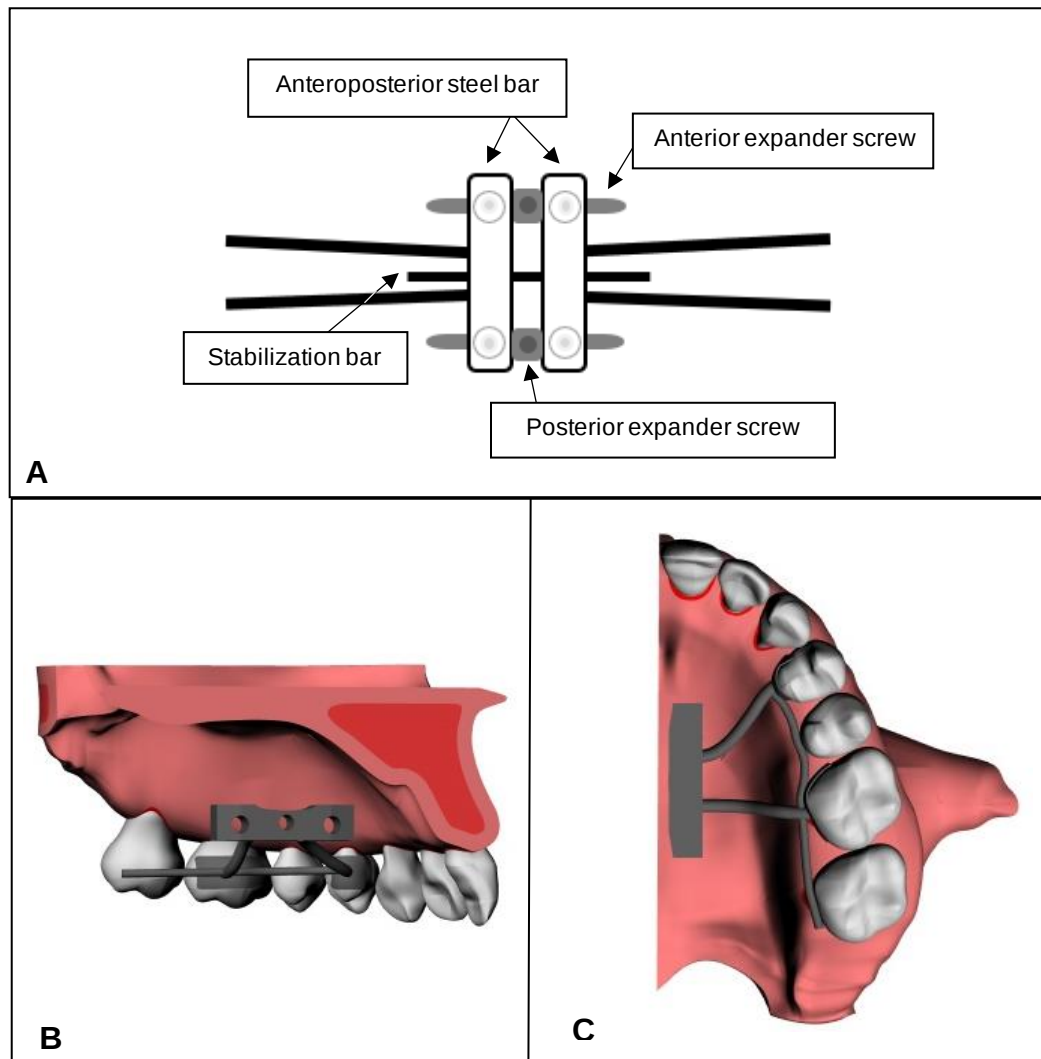
**Figura 5.** Tensão principal máxima, em megapascal, distribuída ao longo da maxila de cada modelo por vistas sagital (A), axial (B) e coronal (C).

**Figura 6.** Tensão de tração, representada por valores positivos na escala de cores, e de compressão por valores negativos em (A) e (B).

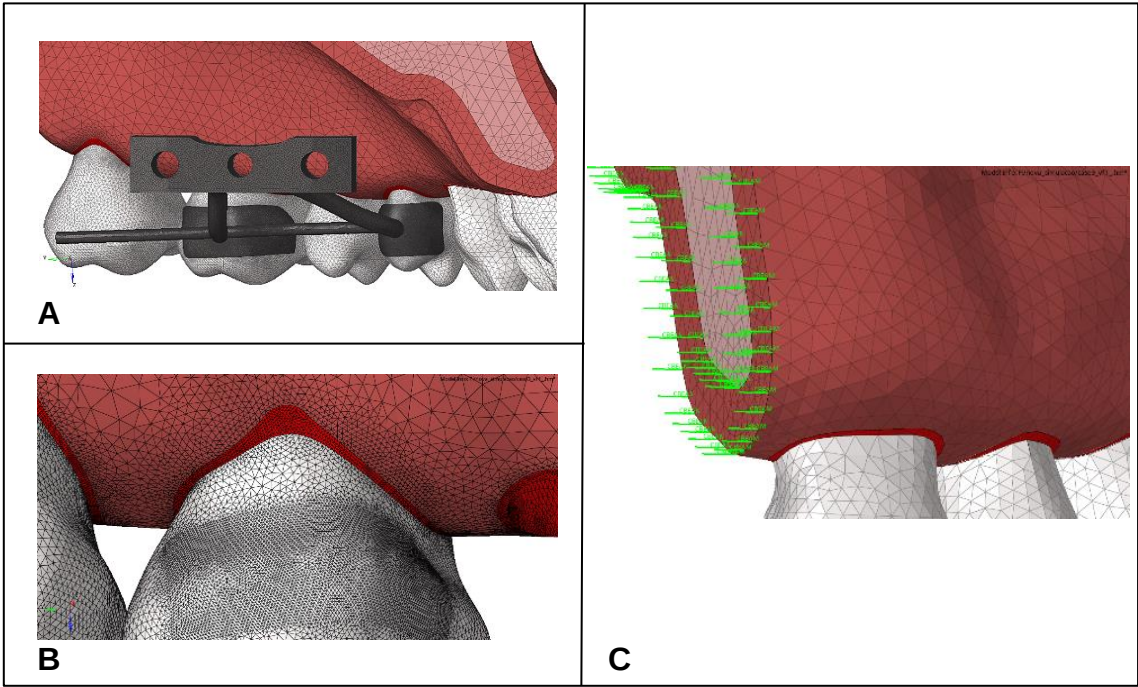
1.



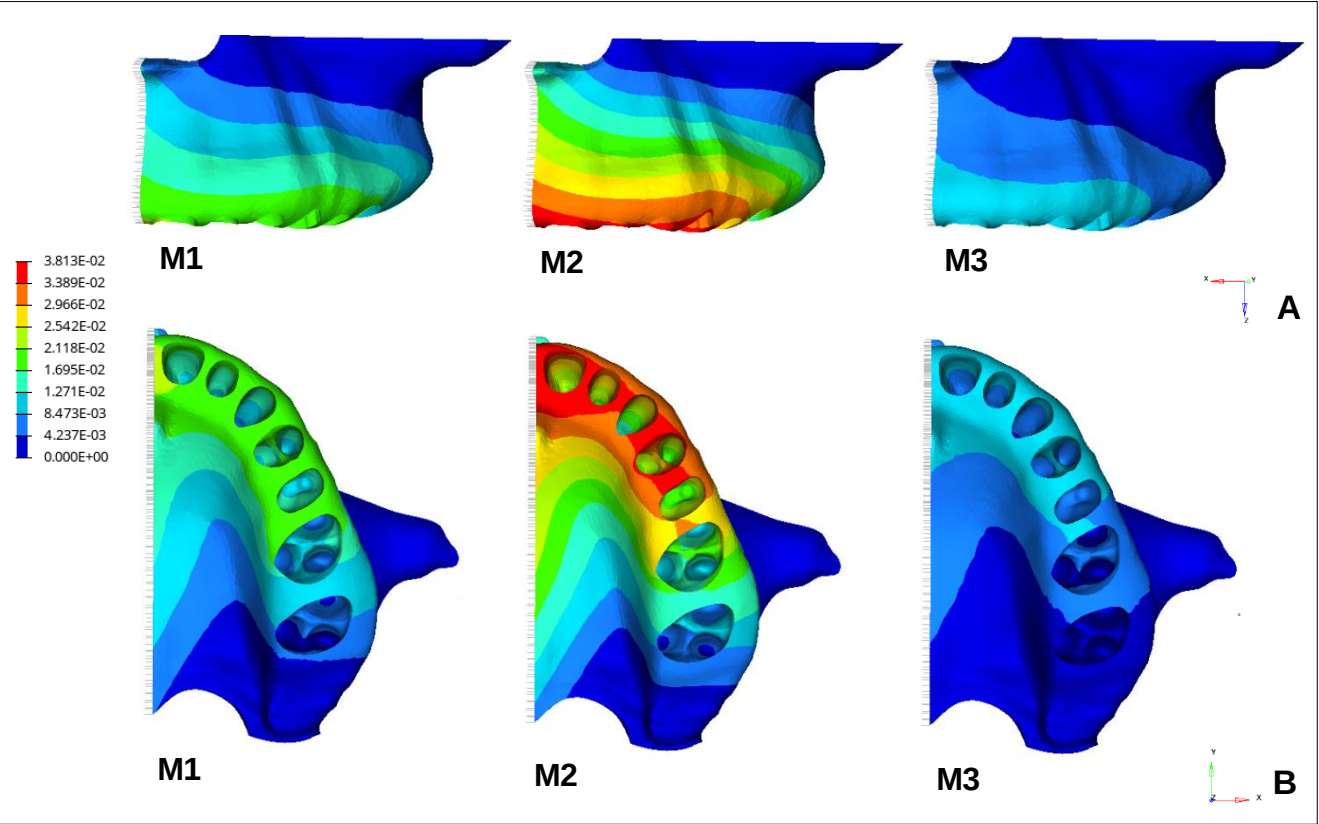
2.



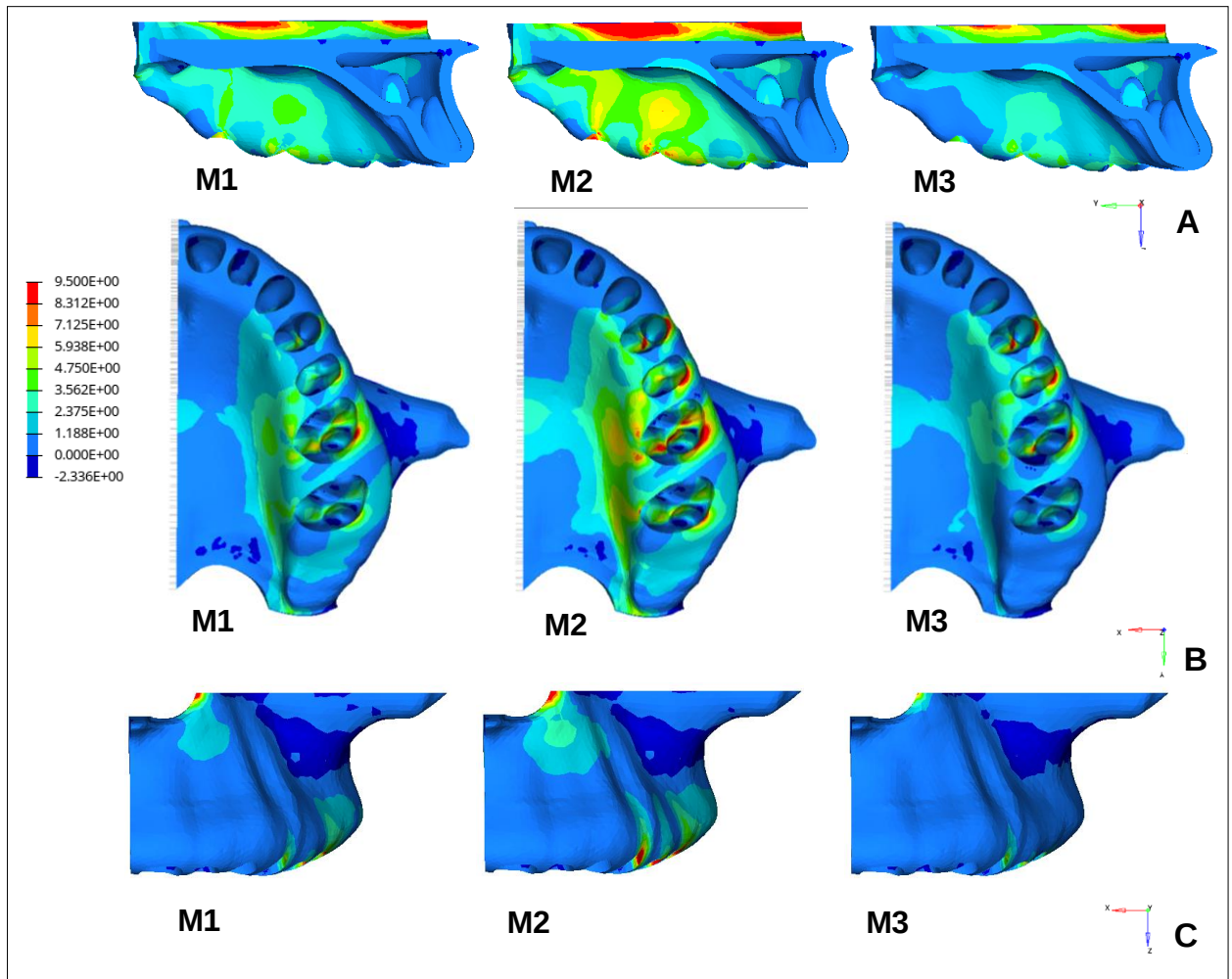
3.



4.



5.



6.

