

Movimentação Ortodôntica com Alinhadores: Método de Elementos Finitos
- Revisão Sistemática integrativa

Mariana Alexandra Moreira Carneiro

Dissertação conducente ao Grau de Mestre em Medicina Dentária (Ciclo Integrado)

Gandra, 19 de julho de 2022

Mariana Alexandra Moreira Carneiro

Dissertação conducente ao Grau de Mestre em Medicina Dentária (Ciclo Integrado)

Movimentação Ortodôntica com Alinhadores- Método de Elementos Finitos
-Revisão Sistemática Integrativa

Trabalho realizado sob a Orientação da Mestre Marta Jorge

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Eu, Mariana acima identificado, declaro ter atuado com absoluta integridade na elaboração deste trabalho, confirmo que em todo o trabalho conducente à sua elaboração não recorri a qualquer forma de falsificação de resultados ou à prática de plágio (ato pelo qual um indivíduo, mesmo por omissão, assume a autoria do trabalho intelectual pertencente a outrem, na sua totalidade ou em partes dele). Mais declaro que todas as frases que retirei de trabalhos anteriores pertencentes a outros autores foram referenciadas ou redigidas com novas palavras, tendo neste caso colocado a citação da fonte bibliográfica.

AGRADECIMENTOS

Chegou ao fim mais uma etapa da minha vida que não teria sido possível ultrapassar sem o apoio, colaboração, incentivo e carinho de várias pessoas. A elas agradeço pelo papel essencial que tiveram na minha vida ao longo dos últimos 5 anos:

Aos meus pais e ao meu irmão, pelo apoio incondicional, agora e sempre, por todo o esforço que fizeram. Quero que saibam que esta conquista não é só minha, mas nossa.

Ao meu namorado que me apoiou sempre em todas as fases boas e menos boas ao longo deste tempo, que sempre me motivou a conseguir mais e melhor, nunca me deixou desistir e ouviu sempre todas as minhas histórias e lamentos com o maior carinho.

À restante família e amigos, pela confiança e motivação, por acreditarem sempre em mim e por alegrarem os meus dias ao longo desta jornada.

E às amigas que fiz desde o início, Bruna, Ana, Inês e mais tarde a Ana Francisco por partilharem comigo esta caminhada de 5 anos e por todos os momentos maravilhosos que vivemos juntas.

À Sofia, a minha binómia e amiga, por todo o companheirismo, entreaajuda, paciência, por me acompanhares nos momentos mais exaustivos deste percurso, mas também nos mais alegres, divertidos e inesperados. Hoje, sei que não teria sido a mesma coisa sem o teu apoio.

Um agradecimento especial à minha orientadora, Professora Marta Jorge, pela paciência e cooperação ao longo destes últimos meses. Um sincero obrigado por todos os conhecimentos e ensinamentos, pela orientação, disponibilidade, ajuda e simpatia, essenciais para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Introdução: Os alinhadores são uma opção de tratamento ortodôntico existente há vários anos e a sua popularidade aumentou devido à elevada procura de uma alternativa mais estética e confortável. Este sistema consiste em movimentar os dentes de forma incremental usando uma sequência de alinhadores. São utilizados por 1 a 2 semanas, e gradualmente ocorre movimentação dentária para a posição planeada e simulada em computador. Foram introduzidos acessórios para tentar ultrapassar as limitações em casos mais complexos, estes elementos podem variar entre attachments, elásticos ou mini-implantes. O método de elementos finitos (MEF) é uma técnica eficaz utilizada para simulação computacional, tratando-se de um método não invasivo e preciso que permite perceber a biomecânica dos dispositivos ortodônticos, estimando as respostas dos tecidos, osso alveolar, dentes e ligamento periodontal. Assim, é possível determinar os padrões de carga utilizados e o deslocamento.

Objetivo: Avaliação dos movimentos ortodônticos: translação, extrusão, intrusão, inclinação e rotação com alinhadores em estudos de elementos finitos.

Material e Métodos: Foi realizada uma pesquisa bibliográfica na base de dados PubMed de artigos dos últimos 10 anos (2012-2022) utilizando as seguintes palavras-chave: *"Aligners"*, *"Finit Element Method"*, *"Finit Element Analysis"*, *"Tooth Movement"*, combinadas entre si com *"AND"*. No final foram selecionados 13 artigos científicos.

Conclusões: A utilização, posição e angulação de acessórios como attachments, mini-implantes e elásticos torna-se crucial para que os movimentos como a translação, extrusão, intrusão, inclinação e rotação sejam eficientes no tratamento ortodôntico com alinhadores.

Palavras-chave: *"finite element method" AND "Aligners"; "Aligners" AND "Finite Element Analysis" AND "Tooth Movement"; "Aligners" AND "Finite Element Method" AND "Tooth Movement"*.

ABSTRACT

Introduction: Aligners are an orthodontic treatment option that has existed for several years and their popularity has increased due to the high demand for a more aesthetic and comfortable alternative. This system consists of moving teeth incrementally using a sequence of aligners. They are worn for 1 to 2 weeks, and gradually tooth movement occurs to the planned and computer-simulated position. Accessories have been introduced to try to overcome the limitations in more complex cases, these elements can vary from attachments, elastics or mini-implants. Finite element modeling (FEM) is an effective technique used for computer simulation. It is a non-invasive and accurate method that allows one to understand the biomechanics of orthodontic devices by estimating the responses of the tissues, alveolar bone, teeth and periodontal ligament. Thus, it is possible to determine the load patterns used and the displacement.

Objective: Evaluation of orthodontic movements: translation, extrusion, intrusion, tipping and rotation with aligners in finite element studies.

Material and Methods: A literature search was conducted in the PubMed database of articles from the last 10 years (2012-2022) using the following keywords: "Aligners", "Finite Element Method", "Finite Element Analysis", "Tooth Movement", combined with "AND". In the end 13 scientific articles were selected.

Conclusions: The use, position and angulation of accessories such as attachments, mini-implants and elastics become crucial for movements such as translation, extrusion, intrusion, inclination and rotation to be efficient in the treatment with aligners.

Keywords: "finite element method" AND "Aligners"; "Aligners" AND "Finite Element Analysis" AND "Tooth Movement"; "Aligners" AND "Finite Element Method" AND "Tooth Movement".

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	4
	ESTRATÉGIAS DE PESQUISA	4
	Tabela 1 - Combinações de palavras-chave e artigos obtidos	4
	CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	4
4	RESULTADOS.....	6
	Tabela 2 - Resultados.....	8
5	DISCUSSÃO	13
	MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO	14
	MOVIMENTO DE EXTRUSÃO.....	15
	MOVIMENTO DE INTRUSÃO.....	16
	MOVIMENTO DE INCLINAÇÃO.....	17
	MOVIMENTO DE ROTAÇÃO	18
6	CONCLUSÕES.....	19
7	REFERÊNCIAS	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma da pesquisa bibliográfica.....	7
---	---

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Combinações de palavras-chave e artigos obtidos.....	4
---	---

Tabela 2 - Resultados	8
-----------------------------	---

ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

- ATT 4.5 - Attachement retangular vertical de 3 mm posicionado na superfície da coroa vestibular do segundo pré-molar direito rorado
- ATT 4.4 4.6 - Attachments retangulares verticais de 3mm na superfície da coroa vestibular, do primeiro pré-molar direito ao primeiro molar direito
- A1 - Configuração 1
- A2 - Configuração 2
- A3 - Configuração 3
- CAT - Terapia de alinhador transparente
- CBCT - Cone Beam Computer Tomography
- GA - Alinhador com encaixe geral
- MEF - Método de elementos finitos
- NA - Alinhador sem encaixe
- PDL - Ligamento periodontal
- OA - Alinhador com encaixe saliente
- PVMS - Pico de tensão de Von Mises
- SEM ATT - Sem attachments
- 3D - Tridimensional

1 INTRODUÇÃO

Os alinhadores são uma opção de tratamento ortodôntico existente há vários anos, a sua popularidade aumentou devido à elevada procura de uma alternativa mais estética e confortável relativamente aos aparelhos fixos convencionais. Estes causam desconforto dificuldade na mastigação e a higiene oral e por vezes levam ao desgaste do esmalte devido ao uso de agentes adesivos para a cimentação dos braquetes.⁽¹⁻³⁾

A Align Technology, em 1997, produziu, através de simulação em computador, um sistema de alinhadores seriados, baseados nos estágios da movimentação dentária. Este sistema consiste em movimentar os dentes de forma incremental usando uma sequência de alinhadores, cada um correspondendo a uma nova posição desejada do dente. São utilizados por 1 a 2 semanas, e gradualmente ocorre movimentação dentária para a posição planeada e simulada em computador. As características dos alinhadores como as propriedades mecânicas do material, a sua espessura, a quantidade de ativação e a necessidade de utilização de elementos auxiliares são definidas através das condições diagnósticas, aquando do planeamento do tratamento em computador.^(4,5)

Nos primórdios os alinhadores eram apenas utilizados para tratamentos ortodônticos simples, pois a sua carga é exercida apenas na área exposta da coroa, induzindo um movimento horizontal do dente. Foram introduzidos elementos auxiliares para tentar ultrapassar as limitações em casos mais complexos, como por exemplo o torque, a rotação e translação (movimento em corpo), estes elementos podem variar entre attachments, elásticos ou mini-implantes.^(2,3,5-7)

O método de elementos finitos (MEF) é uma técnica eficaz de engenharia utilizada para simulação computacional na qual se podem calcular tensões e deformações desenvolvidas num sólido geométrico submetido a forças externas. Nos últimos anos o MEF tem sido amplamente utilizado e aplicado de diferentes formas, em várias áreas da Medicina Dentária, desde fixações até à simulação de movimentos dentários.^(2,3,5,6,8)

O MEF trata-se de um método não invasivo e preciso que permite perceber, entre outras coisas, a biomecânica dos dispositivos ortodônticos, estimando as respostas dos diferentes tecidos, osso alveolar, dentes e ligamento periodontal. Desta forma é possível determinar os padrões de carga utilizados e o deslocamento de acordo com as características do alinhador utilizado, podendo assim, ser calculado o movimento inicial do dente instantaneamente após a aplicação da força.^(4,6,7,9)

2 OBJETIVOS

O objetivo desta revisão bibliográfica consiste na avaliação dos movimentos ortodônticos: movimento de translação, extrusão, intrusão, inclinação e rotação com alinhadores em estudos de elementos finitos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Estratégias de pesquisa

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica na base de dados PubMed de artigos dos últimos 10 anos (2012-2022) utilizando as seguintes palavras-chave: "Aligners", "Finit Element Method", "Finit Element Analysis", "Tooth Movement", combinadas entre si com "AND".

Tabela 1 - Combinações de palavras-chave e artigos obtidos

Combinação	Resultados
<i>((finite element method) AND (Aligners))</i>	596
<i>((Aligners)AND(Finite Element Analysis)AND(Tooth movement))</i>	28
<i>((Aligners)AND(Finite Element method)AND(Tooth movement))</i>	24
Total	648

Critérios de Inclusão e Exclusão

Critérios de Inclusão

- Todos os artigos publicados em inglês nos últimos 10 anos (2012-2022)
- Artigos sobre a movimentação dentária e alinhadores em estudos de elementos finitos.

Critérios de Exclusão

- Todos os artigos com data de publicação anterior a 2012
- Qualquer língua diferente de inglês
- Artigos com tema diferente da movimentação dentária com alinhadores em estudos de elementos finitos.

4 RESULTADOS

Realizaram-se pesquisas nas bases de dados PubMed procurando artigos publicados entre 2012 e 2022. Estas foram restringidas através da aplicação de dois filtros: um filtro para intervalo temporal (2012 a 2022) outro para o idioma das publicações (inglês). Foram selecionados os artigos cujos títulos e resumos iam de encontro aos objetivos deste trabalho. Foram excluídos artigos duplicados e quando os mesmos não cumpriam os critérios de inclusão.

Segundo a base de dados consultada e de acordo com a estratégia de pesquisa, foram encontrados 442 artigos. Após leitura do título, 344 foram excluídos pois não correspondiam aos critérios de inclusão. Os artigos duplicados foram excluídos obtendo-se 23 artigos. Foram também excluídos 4 artigos após a leitura do resumo, uma vez que não cumpriam os critérios de inclusão. Após a leitura completa dos artigos foram excluídos 6 pois não forneciam dados relevantes para o estudo. Os restantes 13 artigos foram incluídos nesta revisão sistemática integrativa. Figura 1. Para contextualização e discussão do tema foi consultado um artigo sobre o método de elementos finitos.

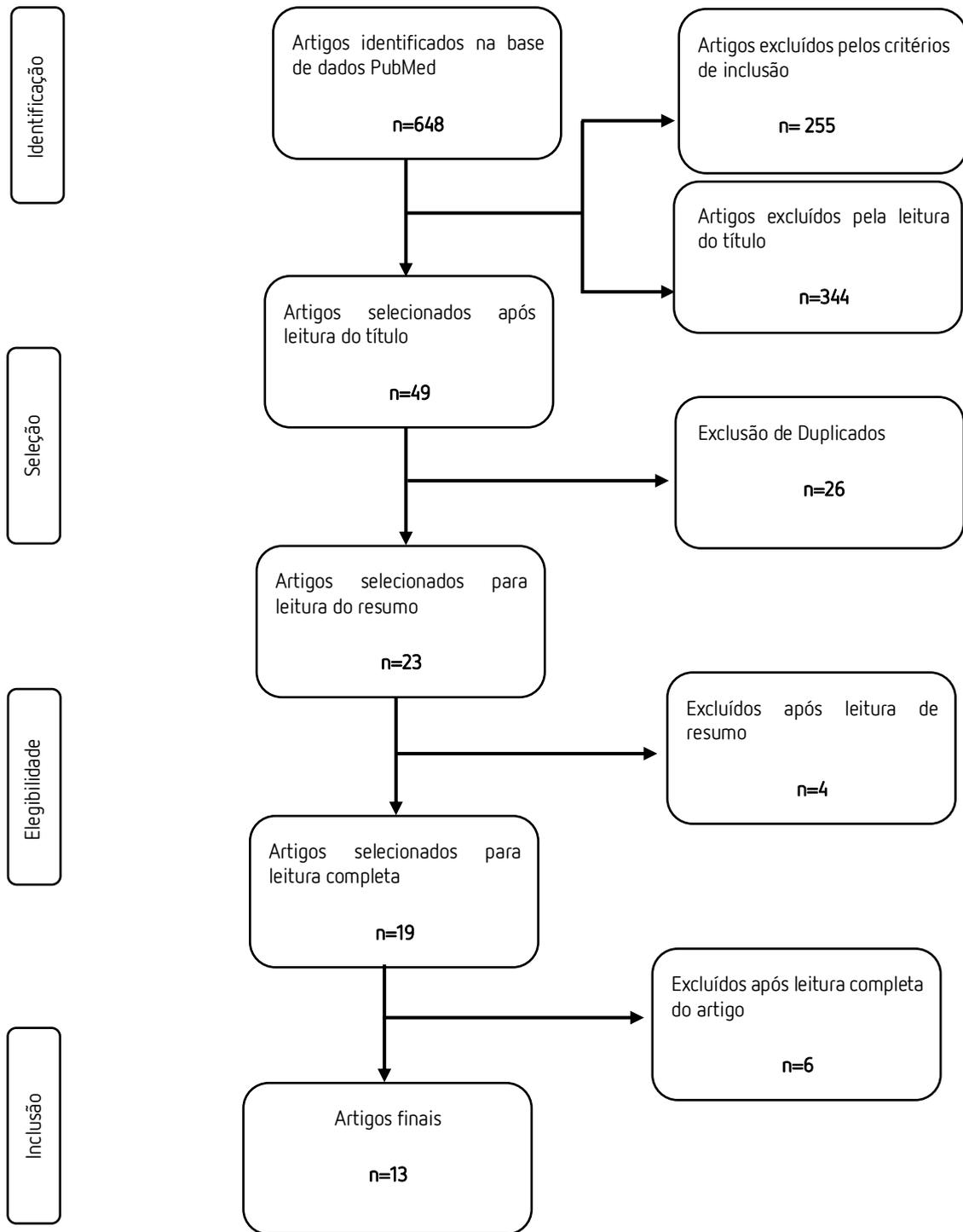


Figura 1- Fluxograma da pesquisa bibliográfica

Tabela 2 - Resultados

Autores/ Ano	Título	Objetivos	Material e Métodos	Resultados	Conclusões
SEO <i>et al.</i>³ (2021)	Análise comparativa da tensão no ligamento periodontal e centro de rotação do dente após tratamento ortodôntico em função da espessura do alinhador -estudo de análise de elementos finitos.	Efeito do tratamento com alinhadores de acordo com a espessura, analisando a distribuição de tensões no ligamento periodontal e as alterações no centro de rotação do dente.	-Três modelos 3D ¹ de EF ² para analisar os efeitos biomecânicos do tratamento; -Alinhadores com diferentes espessuras do incisivo central ao segundo pré-molar.	-O alinhador de 0,75mm obteve resultados maiores na inclinação vestibulo-lingual e na rotação axial mesiodistal; -O centro de rotação do dente na raiz tende a ser elevado em direção à coroa.	- O alinhador mais espesso resultou numa carga ortodôntica maior no dente, pois o centro de rotação do dente deslocou-se do centro de rotação.
HONG <i>et al.</i>² (2021)	Projeto de um attachment do alinhador para induzir o movimento em corpo do dente no tratamento ortodôntico usando análise de elementos finitos.	Design de inserção eficaz para induzir o movimento dentário, comparando e analisando o movimento e a rotação dos dentes entre um attachment geral e um attachment saliente.	-O modelo 3D ¹ de EF ² criado usando CBCT ³ ; -Alinhadores com 0,5 e 0,75 mm de espessura; - Classificados como NA ⁴ , GA ⁵ e OA ⁶ .	-Maior inclinação da coroa no alinhador 0,5mm foi o NA, seguido do GA e do AO. O alinhador 0,75mm foi o GA, seguido do NA e do AO; -O NA registou maior rotação axial.	-O OA reduz o deslocamento do attachment no tratamento; - OA é eficaz na indução movimento em corpo do dente.
KIM <i>et al.</i>⁴ (2020)	Posição ideal de attachment para alinhador removível no canino inferior usando análise de elementos finitos.	Simular várias formas de encaixes para extrusão, intrusão, rotação e torque MEF ⁷ .	-Attachments: meio redondo em secção transversal, meio círculo em secção longitudinal, meio triângulo e oblíquo; -Para rotação tinha um plano perpendicular ao sentido de rotação; - Para torque são meia-volta na secção transversal, meia-volta na secção transversal, longitudinal e 45 graus.	Na extrusão, os valores de PVMS ⁸ diminuíram quando os valores de deslocamento aumentaram; -Na intrusão, os valores aumentaram à medida que a posição passou de incisal para a gengival; -No torque, o menor foi quando fixado na região superior da face lingual.	-A tensão desejável foi observada numa alta área de contato entre o attachment e o alinhador; -O controlo de torque e o movimento pretendido foram alcançados quando os attachments foram posicionados no lado lingual, exceto na intrusão.

1-3D-: Tridimensional; 2- CBCT: Cone Beam computer Tomography; 3-EF: Elementos finitos; 4-NA: Alinhador sem encaixe; 5-GA: Alinhador com encaixe geral; 6-AO: Alinhador com encaixe saliente; 7- MEF: Método de elementos finitos; 8-PVMS: Pico de tensão de Von Mises.

Autores/ Ano	Título	Objetivos	Material e Métodos	Resultados	Conclusões
COMBA <i>et al.</i> ⁷ (2017)	Análise 3D ⁹ da distalização do canino superior com alinhadores, attachments, e Elásticos Classe II, através de EF ¹⁰ .	Utilizar um método de EF ¹⁰ para descrever o sistema de força e os padrões de deslocamento criados por alinhadores no movimento canino, com e sem attachments e elásticos de Classe II.	- Quatro modelos EF ¹⁰ ; - 1º sem attachments, 2º retangular vertical na coroa, 3º attachments otimizados e o 4º tinha attachments otimizados e elásticos Classe II.	-O 1º modelo para distalização mostrou inclinação descontrolada; -Os restantes produziram deslocamento sem inclinação descontrolada; -A intrusão foi reduzida com elásticos de Classe II.	-Modelos com e sem attachment retangular produziram movimentos de intrusão e basculamento; -A aplicação de elásticos Classe II no attachment reduziu significativamente essa intrusão.
JIANG <i>et al.</i> ⁴ (2020)	Alinhadores para retração em massa do maxilar anterior: um estudo de elementos finitos 3D ⁹ .	Comportamentos e as distribuições de tensão de dentes anteriores e posteriores sob diferentes quantidades de protocolos de retração e intrusão com alinhadores por análise 3D ⁹ de EF ¹⁰ .	-Attachments retangulares horizontais para incisivos laterais e attachments retangulares verticais para outros dentes; - A1 ¹¹ : retração de 0,25mm; - A2 ¹² : retração de 0,2 mm com intrusão de 0,15 mm; - A3 ¹³ : retração de 0,1 mm com intrusão de 0,23 mm.	-Incisivos centrais e laterais no deslocamento lingual máximo tiveram uma inclinação lingual descontrolada; -Os deslocamentos na coroa e raiz do incisivo central foram uniformes; -A intrusão do incisivo central foi significativa.	-A discrepância entre o movimento dentário exibido no MEF ¹⁴ e o planeado para os incisivos reiterou a complexidade do sistema de força na terapia com alinhadores.
LIU <i>et al.</i> ⁶ (2021)	Eficácia de um mini-implante anterior na intrusão dos incisivos e torque da raiz palatina para retração anterior com alinhadores: Um estudo de elementos finitos.	Analisar o sistema biomecânico de retração anterior com CAT ¹⁵ com e sem mini-Implante anterior e elásticos.	-Modelos da dentição maxilar, PDL ¹⁶ , attachments e alinhadores; -Três grupos de modelos: 1- controlo; 2- elásticos labiais; 3- elásticos linguoincisais.	-CAT ¹⁵ causou inclinação lingual e extrusão dos incisivos; -CAT ¹⁵ e elásticos labiais causaram torção, intrusão da raiz palatina e inclinação mesial dos incisivos; -CAT ¹⁵ e elásticos linguoincisais produziram torção da raiz palatina e intrusão dos incisivos.	-O CAT ¹⁵ resultou numa mordida aberta; -O mini-implante anterior com elásticos intrusivos foi capaz de alcançar a intrusão dos incisivos e o torque palatino da raiz de forma eficaz; -Elásticos linguoincisais são mais vantajosos.

9-3D: Tridimensional; 10-EF: Elementos Finitos; 11-A1: Configuração 1; 12-A2: Configuração 2; 13-A3: Configuração 3; 14-MEF: Método de elementos finitos; 15-CAT: Terapia de alinhador; 16-PDL: Ligamento periodontal

Autores/ Ano	Título	Objetivos	Material e Métodos	Resultados	Conclusões
AYIDAGA <i>et al.</i>¹⁷ (2021)	Efeitos de formas de fixação compostas variáveis de molares superiores com alinhadores: um estudo de EF ¹⁷ não lineares.	Descrever os padrões de tensão e deslocamento gerados por alinhadores e attachments auxiliares durante a distalização de molares superiores e o efeito de uma nova forma e orientação de attachments no controlo desse movimento.	-Os attachments projetados como retangulares e verticais, feitos de compósito; -Três grupos: a- Sem inserção; b- Com inserção vertical retangular; c- Com inserção de guia.	-A PVMS ¹⁸ foi maior no 2º e 3º grupos em comparação com o 1º; -Deslocamento máximo foi a nível da coroa para todos os grupos.	-Os resultados mostram que a configuração com e sem inserção retangular vertical produziu inclinação do molar na direção mesiodistal; -A inserção guia produziu tensão e padrão de deslocamento que se assemelha ao movimento corporal.
MA <i>et al.</i>⁹ (2021)	O deslocamento ortodôntico ideal do alinhador para condições periodontais leves, moderadas e severas: um estudo in vitro num indivíduo comprometido periodontalmente usando o MEF ¹⁹ .	Objetivo deste estudo é explorar um deslocamento ortodôntico ideal do alinhador usando um MEF ¹⁹ 3D ²⁰ .	-Simulação da intrusão dos dentes anteriores; -Comportamento elástico-linear e módulo de Young padrão e a razão de Poisson do modelo foram considerados; -A PVMS ¹⁸ foi selecionada como o principal indicador para medir o nível de tensão.	-Quando o deslocamento aumenta, a tensão também é mais forte; -A crista do rebordo alveolar deformada quando o deslocamento aumenta em ambas as inclinações axiais.	-O deslocamento ortodôntico ideal é de 0,18 mm. -Para evitar a tensão no topo da crista alveolar, os deslocamentos ideais são inferiores a 0,18 mm, 0,15 mm e 0,10 mm, dependendo da severidade da doença.
CORTONA <i>et al.</i>⁸ (2020)	Terapia ortodôntica com alinhador de dentes arredondados mandibulares rotacionados: Um estudo EF ¹⁷ .	Avaliar, por meio do MEF ¹⁹ o movimento ortodôntico rotacional de um dente arredondado com alinhadores, analisando diferentes configurações de inserção.	-Os attachments foram projetados como retangulares verticais; -Três modelos experimentais: - SEM ATT ²¹ ; - ATT 4.5 ²² ; - ATT 4.4 4.6 ²³ .	SEM ATT ²¹ : deformação máxima do alinhador foi em cérvico-vestibular do o 4,5; -ATT 4.5 ²² : deformação máxima foi em linguo-cervical do dente rodado; -ATT 4.4-4.6 ²³ : a maior deformação foi em cérvico-lingual do dente rodado.	A configuração com o attachment retangular e vertical no elemento 4.5 com 1.28 de ativação parece ser o mais eficiente na rotação do dente; - A deformação do alinhador é um fator chave que influencia os resultados.

17-EF: Elementos Finitos; **18-PVMS:** Pico de tensão de Von Mises; **19-MEF:** Método de elementos finitos; **20-3D:** Tridimensional; **21- SEM ATT:** Sem attachments; **22- ATT 4,5:** Attachment retangular vertical de 3 mm posicionado na superfície da coroa vestibular do segundo pré-molar direito rodado; **23- ATT4,4 4,6:** Attachments retangulares verticais de 3mm na superfície da coroa vestibular, do primeiro pré-molar direito ao primeiro molar direito

Autores / Ano	Título	Título	Material e Métodos	Resultados	Conclusões
BARONE <i>et al.</i>⁵ (2016)	Projeto computacional e engenharia de alinhadores ortodônticos poliméricos.	Estudar os efeitos de vários elementos auxiliares no sistema de carga aplicado a um incisivo central superior e inferior, simulando um movimento de inclinação ortodôntica.	- 5 configurações diferentes de alinhadores: - Alinhador padrão; - Alinhador divot; - Alinhador divot duplo; - Alinhador de attachment vertical; - Alinhador de attachment horizontal.	- A movimentação ortodôntica é melhor alcançada com o uso de attachments; - Os divots causam os maiores valores de deslocamento nas configurações simples e duplas.	- As características dos attachments afetam o sistema de carga; - As cargas geradas pelo divot, tanto na configuração simples como na dupla, são maiores do que com attachments.
GOMEZ <i>et al.</i>¹² (2015)	Sistemas de força inicial durante o movimento em corpo dos dentes com alinhadores e attachments: Uma análise 3D ²⁴ de EF ²⁵ .	Descrever, com um modelo 3D ²⁴ de EF ²⁵ , o sistema de força inicial gerado durante o movimento em corpo dos caninos superiores com alinhadores com e sem attachments em resina composta.	- Um modelo com attachments e um segundo modelo sem attachments; - Comparação dos padrões de tensão de tração-compressão no PDL ²⁶ e padrões de deslocamento dentário.	- Padrões de deslocamento sem attachments: foi equivalente à inclinação de coroa distal não controlada típica; - Padrão de deslocamento com attachments compostos: foi equivalente ao movimento corporal distal típico.	- O sistema de forças do deslocamento com attachments faz o movimento em corpo do dente; - Ausência de attachments no deslocamento produziu uma inclinação descontrolada do dente.
YOKOI <i>et al.</i>⁷ (2019)	Efeitos de attachments no Alinhador no fecho do diastema da denteição maxilar pelo MEF ²⁷ .	Investigar a mecânica do movimento dentário produzido por um alinhador, especialmente o efeito da inserção no movimento em corpo. Para isso, o fecho de um diastema, no qual os incisivos centrais movem-se corporalmente com um alinhador, foi simulado usando os EF ²⁵ .	- Diastema de 0,2 mm; - O alinhador foi dividido em elementos triangulares de 0,45mm de espessura; - O alinhador foi encaixado nos dentes alvo sem qualquer folga.	Alinhador sem attachment, a coroa moveu-se para a posição alvo, mas o ápice radicular não; - Alinhador + attachment, o incisivo sobrepôs-se na posição.	- O incisivo inclinou e girou independentemente do attachment logo após a colocação do alinhador; - No alinhador com attachment, o incisivo moveu-se corporalmente; - A eficácia do attachment foi demonstrada.

24- 3D: Tridimensional; 25- EF: Elementos Finitos; 26-PDL: Ligamento Periodontal; 27- MEF: Método de elementos Finitos.

Autores/ Ano	Título	Objetivos	Material e Métodos	Resultados	Conclusões
<p>SAVIGNANO <i>et al.</i>¹³ (2019)</p>	<p>Efeitos biomecânicos de diferentes desenhos de alinhadores auxiliares para a extrusão de um incisivo central superior: MEF²⁸.</p>	<p>O objetivo deste estudo foi projetar MEF²⁸ para avaliar a efeitos biomecânicos de quatro diferentes configurações de alinhadores de inserção simulando o movimento de extrusão de um incisivo central superior.</p>	<p>- Movimento de extrusão de um incisivo central superior; -Um alinhador padrão foi comparado a alinhadores com três formas e posições de attachments: Fixação palatina retangular; Fixação vestibular retangular; Fixação vestibular elipsóide.</p>	<p>-O deslocamento máximo do dente foi obtido com a inserção palatina retangular, -O menor deslocamento foi com o alinhador padrão sem attachments, mas teve maior movimento indesejado.</p>	<p>-A inserção palatina retangular mostrou-se a melhor configuração para melhorar a eficácia do aparelho para o movimento de extrusão de um incisivo central superior; -A posição do attachment, apresentou maior influência no resultado em relação à sua forma.</p>

28- MEF: Método de elementos Finitos.

5 DISCUSSÃO

A essência do tratamento ortodôntico com alinhadores é a movimentação dentária gerada pela força da deformação do aparelho. A força gerada é transmitida à coroa do dente, aos tecidos periodontais e à raiz do dente através da superfície interna do alinhador, fazendo remodelação dos tecidos e a movimentação dentária. A determinação da quantidade e direção do movimento é feita pelo centro de rotação do dente. Os alinhadores, ao aplicarem uma carga menor no dente causam a movimentação dentária, com menos desconforto para o paciente.^(3,9)

O método de elementos finitos (MEF) é amplamente utilizado em diversos estudos. Este mostra-se um importante instrumento para pesquisas ortodônticas pois calcula distribuições de tensões no ligamento periodontal e osso alveolar durante os movimentos dentários, a direção do deslocamento dentário e a posição ideal dos aparelhos ortodônticos para um movimento específico, além disso, é capaz de moldar e analisar qualquer estrutura dento maxilar. Segundo Knop *et al.* (2014)⁽¹⁰⁾ o MEF é capaz de superar desvantagens de outros métodos pois é preciso, não invasivo, controla variáveis do estudo e fornece dados quantitativos e detalhados sobre respostas fisiológicas que ocorrem nos tecidos e estruturas do complexo dento maxilar. A reconstrução do complexo dento maxilar é feita através de CBCT com cortes transversais de 0,25mm de distância para obter uma melhor resolução.⁽¹⁰⁾

Apesar da popularidade dos alinhadores, continua a existir uma discrepância nos resultados reais obtidos e nos movimentos planejados virtualmente. Esta pode dever-se a um sistema de forças inadequado, mas também à deformação do alinhador após a sua inserção o que leva à perda do movimento dentário programado.⁽¹¹⁾

De seguida vai ser desenvolvido detalhadamente os diversos movimentos ortodônticos induzidos por alinhadores de estudos com elementos finitos.

Movimento de translação

Ayidaga *et al.* (2021)⁽¹¹⁾ para a distalização de molares superiores formaram um grupo sem e um com attachments. No grupo sem attachments ocorreu inclinação descontrolada e um menor deslocamento dentário enquanto no grupo com attachments existiu um maior deslocamento dentário e a inclinação descontrolada foi quase inexistente. Assim, referem que os alinhadores por si só, não são capazes de produzir o movimento em corpo. Os attachments, mini implantes e elásticos são auxiliares necessários para a obtenção de movimentos ortodônticos complexos.⁽¹¹⁾

Também Hong *et al.* (2021)⁽²⁾ no movimento de translação distal de incisivos centrais estudaram grupos de alinhadores com espessuras de 0,5mm e 0,75mm e com e sem attachments. O primeiro grupo NA alinhador sem attachment, segundo grupo GA alinhador com um attachment geral e o terceiro AO com attachment saliente. Após o deslocamento dos dentes foram avaliados os movimentos de inclinação da coroa, rotação e inclinação lingual. O grupo sem attachment foi o que demonstrou mais inclinação da coroa, rotação e inclinação da coroa. O autor afirma que os attachments nas superfícies dos dentes demonstram resultar em movimentos dentários desejáveis. O grupo que induz de forma mais eficaz o movimento em corpo dos incisivos centrais foi o terceiro com um attachment saliente, este reduz o deslocamento do alinhador durante o movimento, os movimentos indesejados e a concentração de tensões nos dentes.⁽²⁾

Para a simulação de um sistema de força para a distalização de um canino superior Comba *et al.* (2017)⁽¹⁾ formaram 4 grupos: sem attachments, attachments retangulares verticais, otimizados e attachments otimizados com elásticos de Classe II. Os autores demonstraram que para uma distalização eficaz do canino as fixações eram indispensáveis, pois estas impediam movimentos indesejáveis como a inclinação da coroa. Os elásticos de Classe II associados a attachments otimizados impedem a intrusão que ocorre no movimento de distalização devido à deformação do alinhador.⁽¹⁾

Liu *et al.* (2021)⁽⁶⁾ analisaram a eficácia de elásticos labiais e linguoincisais conjugados com mini-implantes. A força elástica foi aplicada nos incisivos centrais para os elásticos labiais e para os elásticos linguoincisais foi aplicada no alinhador. No grupo dos elásticos labiais os caninos e incisivos laterais tiveram uma retração sem movimentos indesejados enquanto no incisivo central a translação provocou um momento anti-horário sagital e uma inclinação mesial coronal. No

grupo dos linguoincisais o deslocamento do canino foi eficaz nos três planos sem movimentos indesejados enquanto nos incisivos centrais e laterais a translação provocou um momento anti-horário. Neste estudo os elásticos linguoincisais foram mais vantajosos, conseguindo uma retração anterior mais eficiente através do momento anti-horário produzido. Os autores afirmam que para evitar efeitos colaterais na retração anterior o uso de acessórios como os elásticos e os mini-implantes são vantajosos, oferecendo sistemas de força adicionais ao alinhador.⁽⁶⁾

Jiang *et al.* (2020)⁽⁴⁾ também para a retração anterior utilizaram attachments retangulares horizontais para incisivos laterais e retangulares verticais para os restantes. Elaborou 3 protocolos de retração, o que obteve melhores resultados foi o terceiro em que o autor aplicou uma retração de 0,1mm e uma intrusão de 0,23mm, a intrusão aplicada aos dentes ajudou a gerar um sistema de forças para originar o movimento em corpo dos incisivos sem movimentos indesejados exacerbados.⁽⁴⁾

No fecho de um diastema de 0,2mm interincisivo, Yokoi *et al.* (2019)⁽⁷⁾ verificaram que a eficiência do movimento em corpo dos incisivos foi de quase 100% quando um attachment foi associado ao alinhador, enquanto no alinhador sem attachment os incisivos permaneceram praticamente na posição inicial.⁽⁷⁾

Gomez *et al.* (2015)⁽¹²⁾ analisaram a distalização de caninos superiores, utilizando 2 grupos um com attachments em resina composta e outro sem. Como em vários outros estudos este autor também observou que o movimento quando feito com alinhador e attachment era eficiente sem movimentos indesejados como a inclinação. Os autores concluíram que os attachments em resina composta ajudam a gerar um sistema de forças, produzindo um contra-momento, que por sua vez, favorece o movimento em corpo do canino.⁽¹²⁾

Movimento de Extrusão

Relativamente ao movimento de extrusão Savignano *et al.* (2019)⁽¹³⁾ atestam que os attachments são essenciais para melhorar a eficiência do movimento. No seu estudo comparou formas e posições de attachments para determinar qual o mais eficaz. O

attachment vestibular elipsoide gerou o movimento máximo no dente, mas também movimentos indesejados como a inclinação mesiodistal e palatina. O attachment palatino retangular apresentou maior força ao longo do eixo de extrusão e menores deslocamentos indesejados. O alinhador padrão demonstrou o menor deslocamento dentário e os maiores movimentos colaterais. Assim, os autores afirmam que o attachment palatino retangular é o melhor acessório para a extrusão de incisivos centrais superiores, podendo, este resultado, estar relacionado com os diferentes ângulos entre a superfície ativa do attachment e o dente.⁽¹³⁾

Kim *et al.* (2020)⁽¹⁴⁾ estudaram diferentes configurações de attachments e diferentes posições dos mesmos na extrusão de um canino inferior. Para uma carga aplicada para deslocamento de 0,05mm, o attachment que obteve piores resultados foi com o formato oblíquo. Os formatos quadrado, meio redondo sem secção transversal, meio círculo sem secção longitudinal e meio triângulo obtiveram resultados semelhantes entre si. Relativamente à área de contacto entre o attachment e o alinhador o que apresentou uma área maior foi o meio círculo sem secção longitudinal e menor foi o meio triângulo. No que diz respeito à posição dos attachments, os autores afirmam que os valores de deslocamento do dente aumentam quando o acessório é colocado em gengival e incisal da face vestibular e na face lingual do dente, o que ajuda a controlar os movimentos não intencionais de rotação que o dente pode apresentar na extrusão.⁽¹⁴⁾

Movimento de Intrusão

No movimento de intrusão Kim *et al.* (2020)⁽¹⁴⁾ analisaram, também, os diferentes formatos e posições de attachments no canino inferior. Neste caso os acessórios tinham os mesmos formatos que os utilizados pelo autor no movimento de extrusão, mas eram orientados de forma diferente. O attachment com o formato mais eficaz para o movimento de intrusão foi em forma de meio círculo sem secção longitudinal, pois apresenta maior área de contacto entre o attachment e o alinhador e menor risco de fratura. Relativamente à posição do attachment os valores do deslocamento foram maiores quando este estava no centro da face vestibular e o menor valor foi registado no centro da face lingual. Como na extrusão do canino inferior a colocação do attachment na face lingual minimiza o movimento não intencional de rotação.⁽¹⁴⁾

Também Ma *et al.* (2021)⁽⁹⁾ estudaram o movimento de intrusão em dentes anteriores com diferentes inclinações 90° e 100°. Para tal, simulou vários deslocamentos 0,10mm, 0,15mm, 0,18mm, 0,20mm e 0,25mm para as duas inclinações. Como o deslocamento de 0,20mm a 0,30mm é considerado o padrão nos alinhadores transparentes o deslocamento de 0,20mm a 90° foi considerado o controlo. O deslocamento ideal para os dentes inclinados a 100° e 90° é de 0,18mm para causar danos mínimos aos tecidos radiculares e periodontais. Os autores relatam que existiram limitações neste estudo a primeira foi o facto de apenas ter estudado os quatro dentes anteriores, a segunda foi a influência da idade do paciente, suporte periodontal, comprimento das raízes e densidade óssea nos movimentos dentários e a terceira foi a influência da remodelação do tecido periodontal, o tempo de ação, atenuação da força e dos músculos faciais.⁽⁹⁾

Movimento de Inclinação

Barone *et al.* (2017)⁽⁵⁾ estudaram os efeitos de elementos auxiliares no movimento de inclinação de um incisivo central superior e inferior. Para tal projetou 5 configurações de alinhadores diferentes; o alinhador padrão, o alinhador com divot, com divot duplo, alinhador com attachment vertical e por fim o com attachment horizontal. O alinhador com divot duplo leva a um movimento dentário maior, mas o uso deste formato não é justificável para um movimento de inclinação ortodôntica pois a carga fornecida por um divot é suficiente para obter a movimentação dentária ideal. O estudo mostrou que a localização vertical do divot é muito importante, o que sugere que deve ser selecionada com muita sensibilidade e de modo a fornecer as cargas mais apropriadas ao dente. O alinhador com attachment horizontal proporciona um valor de momento superior ao attachment vertical, mas ambos os alinhadores originam movimentos mais precisos, sem existir grandes movimentos descontrolados.⁽⁵⁾

Seo *et al.* (2021)⁽³⁾ também no movimento de inclinação estudaram qual a espessura do alinhador que era mais eficaz no movimento dentário desejado e na distribuição de tensões no ligamento periodontal. Utilizou dois alinhadores com 0,5mm e 0,75mm de espessura. O alinhador com 0,5mm de espessura alcançou uma inclinação vestibulo-lingual de 1,38 e o alinhador com 0,75mm 1,41. Os autores observaram que as distribuições de tensões no ligamento periodontal eram maiores no alinhador com 0,75mm de espessura, mas as diferenças entre o alinhador mais

espesso e o mais fino não foram estatisticamente significativas. Sendo assim, o alinhador de espessura 0,75mm foi considerado o melhor pois alcança mais efetivamente o movimento de inclinação vestibulo-lingual sem grandes interferências com o ligamento periodontal.⁽³⁾

Movimento de Rotação

No que diz respeito ao movimento de rotação Cortona *et al.* (2020)⁽⁸⁾ avaliaram a rotação de um pré-molar inferior direito (45) utilizando diferentes configurações. Alinhador sem attachment, com attachment retangular vertical de 3mm colocado no dente 45 e um alinhador com attachment retangular vertical colocado do dente 44 ao 46. A rotação do dente foi maior nos grupos com acessório do que sem. Em todas as configurações a rotação predefinida foi perdida devido à deformação do alinhador. A configuração que produziu o maior movimento dentário foi o alinhador com um attachment retangular vertical colocado do dente 44 ao 46. Os autores afirmam de acordo com os resultados do estudo que a rotação dos dentes inferiores é mais efetiva e controlada quando são utilizados attachments.⁽⁸⁾

Kim *et al.* (2020)⁽¹⁴⁾ relativamente ao movimento de rotação analisaram um attachment em diferentes ângulos. O acessório foi colocado perpendicularmente ao sentido de rotação e colocado a 90°, 65° e 45°. O attachment com valores de rotação mais altos foi o com angulação de 65° e os valores mais baixos foram obtidos com o attachment a 45°. Relativamente à área de contacto do acessório com o alinhador a maior foi na angulação 90° e a menor foi 45°. Assim sendo, os autores consideram a angulação de 65° para o attachment a melhor para conseguir um movimento de rotação mais eficaz com alinhadores.⁽¹⁴⁾

6 CONCLUSÕES

O tratamento ortodôntico com alinhadores é atualmente muito utilizado por crianças e adultos, visto que oferece mais estética, conforto e facilidade de higienização ao paciente.

- 1- Para o movimento de translação conclui-se que o alinhador por si só não consegue realizar um movimento eficaz, para o tornar eficiente a utilização de attachments, mini-implantes e elásticos é fundamental. Os attachments demonstram diminuir os movimentos indesejáveis. Os elásticos e mini-implantes tornam-se muito vantajosos no movimento em corpo pois oferecem um sistema de forças adicional.
- 2- Conclui-se que para uma melhor extrusão a associação de attachments com o alinhador é crucial. No que diz respeito à posição os valores de deslocamento aumentam quando os attachments são colocados nas faces linguais e palatinas dos dentes, podendo os resultados estarem relacionados com os diferentes ângulos entre a superfície ativa do attachment e o dente e a diminuição de movimentos não intencionais.
- 3- Relativamente ao movimento de intrusão conclui-se que o deslocamento ideal para dentes inclinados 90° e 100° é de 0,18mm para causar danos mínimos aos tecidos radiculares e periodontais. A posição ideal do attachment para um deslocamento ótimo e com movimentos indesejáveis mínimos é no centro da face vestibular.
- 4- No movimento de inclinação conclui-se que a utilização de um alinhador mais espesso (0,75mm) é melhor pois alcança mais efetivamente o movimento sem grandes interferências com o ligamento periodontal. Para um movimento ainda mais eficaz a associação de um attachment horizontal ao alinhador é recomendada pois este proporciona um valor do momento maior do que o attachment vertical.
- 5- No que diz respeito ao movimento de rotação conclui-se que o movimento é mais efetivo e controlado quando são utilizados attachments juntamente com o alinhador. A angulação ideal para este attachment é de 65° .

A utilização de acessórios como attachments, mini-implantes e elásticos torna-se de fundamental importância para que os movimentos como a translação, extrusão, intrusão, inclinação e rotação sejam eficientes no tratamento com alinhadores.

Sendo este um tema em constante crescimento são necessários mais estudos in-vivo para melhor conhecimento e estudo dos resultados.

7 REFERÊNCIAS

1. Comba B, Parrini S, Rossini G, Castroflorio T, Deregibus A. A Three-Dimensional Finite Element Analysis of Upper-Canine Distalization with Clear Aligners, Composite Attachments, and Class II Elastics. *J Clin Orthod.*2017;51(1):24-8.
2. Hong K, Kim WH, Eghan-Acquah E, Lee JH, Lee BK, Kim B. Efficient Design of a Clear Aligner Attachment to Induce Bodily Tooth Movement in Orthodontic Treatment Using Finite Element Analysis. *Materials.*2021;14(17):1-11.
3. Seo JH, Eghan-Acquah E, Kim MS, Lee JH, Jeong YH, Jung TG, Hong M, Kim WH, Kim B, Lee SJ. Comparative Analysis of Stress in the Periodontal Ligament and Center of Rotation in the Tooth after Orthodontic Treatment Depending on Clear Aligner Thickness-Finite Element Analysis Study. *Materials.*2021; 9;14(2):1-17.
4. Jiang T, Wu RY, Wang JK, Wang HH, Tang GH. Clear aligners for maxillary anterior en masse retraction: a 3D finite element study. *Sci Rep.*2020; 23;10(1):1-8.
5. Barone S, Paoli A, Razionale AV, Savignano R. Computational design and engineering of polymeric orthodontic aligners. *Int J Numer Method Biomed Eng.*2017;33(8):1-1.
6. Liu L, Zhan Q, Zhou J, Kuang Q, Yan X, Zhang X, et al. Effectiveness of an anterior mini screw in achieving incisor intrusion and palatal root torque for anterior retraction with clear aligners. *Angle Orthod.*2021 1;91(6):794-803.
7. Yokoi Y, Arai A, Kawamura J, Uozumi T, Usui Y, Okafuji N. Effects of Attachment of Plastic Aligner in Closing of Diastema of Maxillary Dentition by Finite Element Method. *J Healthc Eng.*2019; 3;2019:1-6.
8. Cortona A, Rossini G, Parrini S, Deregibus A, Castroflorio T. Clear aligner orthodontic therapy of rotated mandibular round-shaped teeth: A finite element study. *Angle Orthod.*2020;1;90(2):247-54.
9. Ma Y, Li S. The optimal orthodontic displacement of clear aligner for mild, moderate and severe periodontal conditions: an in vitro study in a periodontally compromised individual using the finite element model. *BMC Oral Health.*2021;1;21(1):109:1-8.
10. Knop L, Gandini LG, Shintcovsk RL, Gandini MR. Scientific use of the finite element method in orthodontics. *Dental Press J of Orthod.*2015;20(2):119-25.

11. Ayidaga C, Kamiloglu B. Effects of Variable Composite Attachment Shapes in Controlling Upper Molar Distalization with Aligners: A Nonlinear Finite Element Study. *J Healthc Eng.*2021;20;2021:1-8.
12. Gomez JP, Peña FM, Martínez V, Giraldo DC, Cardona CI. Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments: A three-dimensional finite element analysis. *Angle Orthod.*2015;1;85(3):454-60.
13. Savignano R, Valentino R, Razionale A v., Michelotti A, Barone S, D'Antò V. Biomechanical Effects of Different Auxiliary-Aligner Designs for the Extrusion of an Upper Central Incisor: A Finite Element Analysis. *J Healthc Eng.*2019;7:9687127:1-9.
14. Kim WH, Hong K, Lim D, Lee JH, Jung YJ, Kim B. Optimal position of attachment for removable thermoplastic aligner on the lower canine using finite element analysis. *Materials.*2020;1;13(15):1-22.