



**INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ**

**MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA**

**BIOMECÂNICA DOS ALINHADORES: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho submetido por

**Maria Franco Correia**

para obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

outubro de 2022





**INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ**

**MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA**

**BIOMECÂNICA DOS ALINHADORES: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho submetido por

**Maria Franco Correia**

para obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

Trabalho orientado por

**Prof. Doutora Teresa Sobral Costa**

outubro de 2022



## **RESUMO**

Desde que foi introduzida, a técnica dos alinhadores ortodônticos transparentes e o seu apelo estético, têm atraído cada vez mais a atenção dos pacientes, principalmente de idade adulta, que procuram uma alternativa aos aparelhos convencionais.

Esta revisão reúne conceitos sobre a biologia, bioquímica e mecânica do movimento dentário, visando a descrição e explicação do movimento realizado com o uso dos alinhadores e os mais recentes avanços desta tecnologia inovadora.

Com o plano de tratamento adequado, este tipo de aparelho ortodôntico é capaz de realizar a maioria dos movimentos com precisão. Não obstante, é referido muitas vezes o uso de acessórios ou até mesmo a combinação com terapêutica ortodôntica fixa convencional para concretizar alguns dos movimentos mais complexos.

As discrepâncias de opiniões e os diferentes resultados apresentados para cada caso relativamente à precisão e previsibilidade dos movimentos, revelam a necessidade de continuar a estudar a eficácia dos alinhadores assim como a pesquisar os fatores e variáveis que influenciam o comportamento mecânico dos mesmos.



## **ABSTRACT**

Since introduced, clear aligners technique and its aesthetic appeal, has brought the patient's attention, specially the adults, who look for an alternative to conventional fixed appliances.

This review gathers concepts about biology, biochemistry and mechanics of tooth movement, aiming the description and explanation of the movement made with the use of clear aligners and the most recent improvements of this inovative tecnology.

With the proper treatment plan, this tipe of orthodontic appliances is capable of realizing most movements with accuracy. However, it is mentioned several times that the use of accessories or even the combination with fixed appliances to achieve some of the most complex movements.

The discrepancies of opinions and different results obtained in each case concerning the accuracy and predictability of the movements, reveal the necessity to keep studyng the efficacy of clear aligners as well as researching factors and variables that influence the mechanical behavior of the aligners.



## ÍNDICE GERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	Contextualização e justificção do trabalho.....	13
1.2	Objetivos.....	13
1.3	Metodologia.....	14
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	15
2.1	Periodonto.....	15
2.2	Movimento dentário.....	16
2.2.1	Movimento dentário fisiológico.....	16
2.2.2	Bioqumica do movimento dentário.....	18
2.2.3	Biomecnica do movimento dentário.....	19
2.2.3.1	Corpo.....	21
2.2.3.2	Centro de resistncia.....	21
2.2.3.3	Força.....	21
2.2.3.4	Momento da força.....	23
2.2.3.5	Momento de um binário.....	23
2.2.3.6	Centro de rotao.....	24
2.3	Movimentos ortodnticos.....	24
2.3.1	Inclinao.....	25
2.3.2	Translao.....	25
2.3.3	Torque.....	26
2.3.4	Rotação.....	27
2.3.5	Intruso e extruso.....	27
2.3.6	Ancoragem.....	29
2.4	Alinhadores transparentes.....	30
2.4.1	Materiais.....	30
2.4.2	Prncpios.....	34
2.4.3	Movimentos realizados.....	36
2.4.3.1	Inclinao.....	37
2.4.3.2	Torque.....	38
2.4.3.3	Rotação.....	39
2.4.3.4	Intruso.....	40
2.4.3.5	Extruso.....	42
2.4.3.6	Distalizao.....	42
2.4.3.7	Expanso.....	44
2.4.4	Limitaes.....	45
2.4.5	Vantagens e desvantagens.....	46

<b>3</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>51</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Componentes de um vetor. ....	22
<b>Figura 2</b> – Paralelogramo de forças .....	23
<b>Figura 3</b> – Momento de uma força resultante da interação do conjunto dente/bracket com o arco ortodôntico.....	24
<b>Figura 4</b> – Diferentes tipos de inclinação consoante a localização do centro de rotação relativamente ao centro de resistência do dente. Inclinação não controlada (4-a) e inclinação controlada (4-b) .....	25
<b>Figura 5</b> - Movimento de translação dentária .....	26
<b>Figura 6</b> – Movimento de torque.....	27
<b>Figura 7</b> – Movimento de intrusão de um dente anterior. Sistema de forças de um binário (7-a) e sistema de forças de dois binários (7-b).....	28
<b>Figura 8</b> – Sequência de deformação elástica do alinhador e ativação de forças consequentes.....	36
<b>Figura 9</b> – Fórmula da precisão do movimento.....	37
<b>Figura 10</b> – Binário necessário para executar o movimento de torque palatino .....	38
<b>Figura 11</b> – Uso de mini-parafusos na intrusão dos incisivos centrais superiores .....	41
<b>Figura 12</b> – Representação de alguns pontos e linhas cefalométricas.....	44





## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Valor de ancoragem em mm quadrados .....	30
<b>Tabela 2</b> – Componentes e nomes comerciais de alguns materiais que compõem os alinhadores ortodônticos.....	31
<b>Tabela 3-</b> Forças produzidas por diferentes materiais termoplásticos consoante a espessura e ativação do material.....	33



## LISTA DE ABREVIATURAS

BMP = *Bone Morphogenetic Protein*

°C = graus *Celcius*

Co = *Condilium*: ponto mais pósterio-superior no contorno do côndilo mandibular

Cres = Centro de resistência

Crot = Centro de rotação

COX-2 = *Ciclooxygenase 2*

$C_{IT}$  = *Indentation creep* - aumento da percentagem de profundidade de indentação sob uma carga constante durante um determinado período de tempo

DVO = Dimensão Vertical Oclusal

FGF-23 = *Fibroblast Growth Factor*

Go = *Gonion*: Ponto formado pela interseção do plano mandibular com uma tangente ao bordo posterior do ramo mandibular

IL-1 = Interleucina 1

IL-6 = Interleucina 6

IL-17 = Interleucina 17

JAC = Junção Amelo Cimentária

LPD = Ligamento Periodontal

kg = Quilogramas

M-CSF = *Macrophage Colony-Stimulating Factor*

$Mc$  = Momento do binário

Me = *Menton*: Ponto mais inferior no contorno da sínfise mandibular

$Mf$  = Momento da força

mm = Milímetros

$Nm$  = *Newton Meter*

OPG = *Osteoprotegerin*

PAR = *Peer Assesement Rating*

PGE2 = Prostaglandina 2

PSI = *pounds per square inch*

RANK = *Receptor Activator of Nuclear Factor Kappa*

RANKL = *Receptor Activator of Nuclear Factor Kappa B Ligand*

SI = Sistema Internacional

TAD = *Temporary Anchorage Device*

VEGF = *Vascular Endotelial Growth Factor*

TGF –  $\beta$ 1 = *Transforming Growth Factor*

TNF- $\alpha$  = *Tumor Necrosis Factor*

TRAP = *Thrombin Receptor Activating Peptide*

$\eta_{IT}$  = Índice de elasticidade

3D = três dimensões

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e justificação do trabalho

No contexto ortodôntico, a biomecânica é entendida como a reação dos dentes e estruturas faciais à força ortodôntica. Ao prolongar a pressão ligeira sobre os dentes, ocorrerá movimento dentário acompanhado de remodelação óssea. Esta resposta do osso à pressão é mediada pelo ligamento periodontal (LPD) e, conseqüentemente, o movimento dentário ocorre pela remoção óssea seletiva em algumas áreas e pela adição de osso noutras. A carga induzida nos dentes inicia uma cascata inflamatória que precisa de ser bem controlada, uma vez que a inflamação desregulada leva à destruição dos tecidos traduzindo-se em reabsorção radicular.

Os alinhadores ortodônticos sofreram uma grande evolução tecnológica, quer dos materiais, quer das técnicas de produção utilizadas, permitindo cada vez mais melhorias ao nível do controlo e posicionamento dos dentes nos três planos do espaço. A digitalização de imagem dos dentes do paciente permite que estes sejam replicados num modelo 3D que pode ser manipulado e virtualmente corrigido através de um plano de tratamento desenvolvido pelo clínico e traduzido pelos alinhadores ortodônticos, o que torna esta técnica uma das áreas mais inovadoras da prática ortodôntica quotidiana.

Quando surgiram, os alinhadores eram indicados apenas em casos onde se pretendia movimentos dentários suaves e moderados, como pequenos apinhamentos ou diastemas. Estudos mais recentes demonstram que este tipo de aparelho é capaz de realizar movimentos mais complexos como: distalização molar, torque incisivo superior e rotação pré-molar, intrusão anterior, inclinação vestibulo-lingual posterior e translação dos molares superiores até 1,5mm.

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta monografia é analisar a bibliografia já existente sobre a eficácia dos alinhadores ortodônticos nos inúmeros movimentos dentários possíveis de alcançar, tendo por base a biomecânica destes aparelhos. Sendo um tema não consensual perante diversos autores e, estando em constante renovação, o principal propósito deste trabalho é manter atualizada a informação respeitante.

### **1.3 Metodologia**

A recolha de informação foi conduzida através de uma busca eletrónica de artigos e revisões sistemáticas nas bases de dados *PubMed*, *Cochrane* e *Google Scholar* bem como busca manual. A pesquisa foi efetuada em duas fases: inicialmente foi investigado o tema cujo título concerne. Com as palavras-chave: “*Aligners*”, “*Biomechanics of aligners*”, “*Efficacy*” e “*Clear aligners*” e, num segundo momento de pesquisa foram aprofundados alguns conceitos relacionados com os princípios da ortodontia, com o periodonto e com o osso de forma a entender e enquadrar melhor o tema.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Periodonto**

O periodonto é o complexo que confere suporte aos dentes e inclui tecidos moles como a gengiva e o ligamento periodontal, e tecidos duros que correspondem ao cimento e osso alveolar (Li et al., 2018). Para entender melhor a forma como os dentes se movimentam e a resposta que os tecidos circundantes têm, é importante conhecer a constituição destes tecidos assim como os mecanismos de formação e reabsorção óssea.

O ligamento periodontal (LPD) é uma estrutura de suporte que separa o cimento que rodeia a raiz dentária do osso alveolar e é constituído essencialmente por feixes de fibras de colagénio, células mesenquimatosas, elementos vasculares e neurais e fluídos tecidulares. Tem uma espessura que varia de 0,15 a 0,38mm e vai diminuindo gradualmente com o avanço da idade. A sua principal função é manter o dente no alvéolo e suportar forças de mastigação, mas também tem capacidades proprioceptoras que permitem posicionar os maxilares de forma correta durante a mastigação. (Nanci & Bosshardt, 2006; Proffit et al., 2019).

Os dentes encontram-se inseridos no processo alveolar do osso. Este apresenta tábuas externas vestibulares e linguais/palatinas conhecidas como osso cortical, uma parte central denominado osso esponjoso/trabecular e o osso que reveste o alvéolo dentário que é o osso alveolar propriamente dito onde se unem feixes de fibras do LPD. O osso cortical é, por norma, mais fino na maxila que na mandíbula e mais fino na vertente vestibular. A parede óssea do alvéolo dentário está em constante remodelação e a organização da sua estrutura varia ao longo da sua extensão em resposta aos movimentos dentários que ocorrem derivados das forças de mastigação (Saffar et al., 1997; Nanci & Bosshardt, 2006).

A evidência comprova que existem alterações na estrutura óssea com o avançar da idade, nomeadamente ao nível da densidade, porosidade e quantidade de osteócitos presentes nas lacunas. Portanto, indivíduos mais jovens apresentam uma maior taxa de formação e reabsorção óssea, pois existe uma maior quantidade de osteócitos. Sabemos ainda que, com o avançar da idade há um aumento da reabsorção óssea e que, indivíduos

com idade superior a 70 anos apresentam 25% da superfície óssea ocupada por reabsorção (Jowsey, 1960).

## **2.2 Movimento dentário**

O movimento dentário é mediado pelo LPD, que liga o dente ao osso adjacente, e ocorre através da reabsorção e formação do osso circundante onde diversas células têm um papel crucial, tais como os osteoblastos, osteoclastos e os osteócitos. Podem também ser encontrados macrófagos, células endoteliais e adipócitos no osso alveolar. A carga induzida nos dentes inicia uma cascata inflamatória que culmina na reabsorção de osteoclastos e deposição óssea por osteoblastos em áreas de compressão e áreas de tensão, respetivamente. Se a força aplicada for mantida, a pressão do oxigénio no fluxo sanguíneo altera rapidamente, assim como ocorrem alterações no ambiente químico, libertando agentes biologicamente ativos, como prostaglandinas e citoquinas. A inflamação que ocorre durante a movimentação dentária precisa de ser bem controlada, uma vez que a inflamação desregulada leva à destruição do tecido traduzindo-se em reabsorção radicular (Li et al., 2018).

### **2.2.1 Movimento dentário fisiológico**

Existem diferentes tipos de movimento dentário que são considerados fisiológicos pois ocorrem em consequência das funções do organismo. O processo de erupção dentária ativa pode ser dividido numa fase pré-funcional e numa fase pós-funcional, e compreende o período desde a emergência do dente na cavidade oral até atingir o seu antagonista. Após ser estabelecido o contacto oclusal, ainda que seja contínua, a velocidade de erupção diminui, pelo que a partir dos 10 anos diminui gradualmente até aos 17-18 anos, idade após a qual a velocidade de erupção diminui em valores na ordem dos 0,1 a 0,2 mm por ano. (Steedle & Proffit, 1985; Iseri & Solow, 1996).

A erupção secundária ativa ocorre quando é criado espaço interoclusal por causas não desejadas. Por exemplo, pode ocorrer como mecanismo de compensação do desgaste ou perda de estrutura dentária (lesões de cárie, desgaste oclusal), ou até mesmo em casos de ausência completa do dente antagonista, resultando num excesso de erupção para tentar atingir a dimensão vertical oclusal (DVO) (Ahmad, 2017).

Sabe-se que a largura, profundidade e perímetro das arcadas dentárias alteram-se ao longo do tempo, principalmente entre transições de dentições: (Moyers et al., 1976)

### **Distância intercanina (largura)**

- Maxilar: aumenta três mm (milímetros) no início da dentição mista e mais dois mm após a erupção do canino permanente.

- Mandibular: aumenta três mm no início da dentição mista e quase não se altera com a erupção dos caninos permanentes.

### **Profundidade do arco (incisivo-molar)**

- Maxilar: diminui ligeiramente na dentição mista precoce, aumenta um a dois mm com a erupção dos incisivos permanentes e diminui dois mm com a perda dos molares decíduos.

- Mandibular: diminui ligeiramente na dentição mista precoce, mantém-se praticamente constante durante a dentição mista e diminui dois a três mm com a perda dos molares decíduos.

### **Perímetro da arcada (do primeiro molar ao molar contralateral)**

- Maxilar: aumenta quatro a cinco mm no início da dentição mista precoce e diminui cerca de quatro mm ao longo da dentição mista.

- Mandibular: aumenta dois mm na dentição mista precoce, diminui 4-6 na dentição mista tardia, resultando numa diminuição de 3,5 mm no sexo masculino e 4,5 mm no sexo feminino.

Estudos comprovam que existe uma tendência natural para a migração mesial mesmo após se iniciar o período funcional dos dentes, ou seja, após ser estabelecida a oclusão com o dente antagonista. Um conjunto de componentes verticais e horizontais resultam num movimento oblíquo e, portanto, a mesialização faz-se acompanhar de mesio-inclinação. Este tipo de movimento pode surgir como resposta ao desgaste natural das superfícies interproximais, mas é também uma forma de compensar o facto de os maxilares terem um crescimento predominantemente no sentido anterior (Stein & Weimann, 1925; Saffar et al., 1997).

Os dentes anteriores estão ainda sujeitos à influência do contacto com os lábios e a língua. Enquanto os lábios aplicam uma força aos incisivos no sentido lingual, a língua

aplica uma força de componente anterior. Os tecidos moles não têm tanta implicação no movimento dos dentes posteriores, com exceção dos pré-molares inferiores onde a língua irá ter alguma influência em situações de alívio de apinhamento (Isaacson et al., 2002).

### 2.2.2 Bioquímica do movimento dentário

Sendo o osso alveolar um dos tecidos esqueléticos mais reativos, ao ser aplicada força ortodôntica, é gerado stress que é transmitido ao LPD provocando uma resposta inflamatória que irá gerar movimento dentário. As zonas de compressão estimulam a osteoclastogênese e a atividade dos osteoclastos, enquanto as zonas que ficam sob tensão ativam os osteoblastos (Alikhani et al., 2018).

A formação de osso, ou osteoblastogênese, ocorre em duas fases distintas. É guiada essencialmente pelos osteoblastos que são células mononucleares derivadas de células-tronco mesenquimatosas que quando atingem maturidade sintetizam uma substância orgânica intercelular de consistência firme conhecida como tecido osteóide (uma mistura de proteínas colagenosas e não colagenosas). Numa segunda fase os osteoblastos são estimulados por fatores de crescimento e outros fatores extracelulares tais como TGF- $\beta$ 1 (*Transforming Growth Factor*), BMP (*Bone Morphogenetic Protein*) e VEGF (*Vascular Endothelial Growth Factor*), que são proteínas responsáveis pela proliferação, diferenciação, sobrevivência e função dos osteoblastos e, como tal, encontram-se em níveis mais elevados no lado da aposição óssea onde há maior diferenciação destas células (Weinmann, 1954; Alikhani et al., 2018).

Os osteócitos têm origem em osteoblastos na fase final de diferenciação e ficam embebidos na matriz óssea durante a mineralização de osso. Quando é exercida uma ação mecânica sobre o osso, este deforma-se e há um deslocamento do fluido intersticial e do sistema canaliculo-lacunar (conjunto de matriz óssea e rede de osteócitos). Posteriormente, os mecanoreceptores da membrana dos osteócitos são ativados criando vias de sinalização que alteram a produção de fatores bioquímicos essenciais na remodelação óssea. Os osteócitos podem ainda inibir a formação de osteoblastos através da libertação de esclerositina e FGF-23 (*Fibroblast Growth Factor*) (Uda et al., 2017; Proffit et al., 2019).

A reabsorção óssea, ou osteoclastogênese, é um processo que integra o crescimento ósseo necessário para a regeneração de tecido ósseo, em que todos os componentes orgânicos e inorgânicos são removidos. As células maioritariamente envolvidas são os osteoclastos que se encontram normalmente em depressões presentes na superfície óssea conhecidas como lacunas *Howship*. Os osteoclastos são células precursoras de outras células denominadas de osteócitos que, por sua vez, resultam da fusão de monócitos/células precursoras de macrófagos. Quando maduros, os osteoclastos expressam recetores de calcitonina, TRAP (*Thrombin Receptor Activating Peptide*) e catepsina-K e uma série de outras proteases que vão digerir a matriz extracelular. Na sua superfície, os osteoclastos apresentam bombas de prótons que permitem acidificar a superfícies óssea causando reabsorção (Weinmann, 1954; Alikhani et al., 2018).

A formação de osteoclastos está dependente de alguns fatores derivados dos osteoblastos como RANK (*Receptor Activator of Nuclear Factor Kappa*), M-CSF (*Macrophage Colony-Stimulating Factor*) e OPG (*Osteoprotegerin*). Os dois primeiros, por sua vez, são estimulados por outros fatores induzidos pela ação da força mecânica conhecidos como COX-2 (*Ciclooxigenase 2*) / PGE2 (Prostaglandina 2), VEGF e algumas citocinas inflamatórias como IL-1 (Interleucina 1), IL-6 (Interleucina 6), IL-17 (Interleucina 17), TNF- $\alpha$  (*Tumor Necrosis Factor*) e *Interferon- $\gamma$* . O RANKL (*Receptor Activator of Nuclear Factor Kappa B Ligand*) existente nos osteoblastos irá ligar-se ao RANK presente na superfície dos precursores dos osteoclastos e o mesmo acontece com o M-CSF (*Macrophage Colony-Stimulating Factor*) que se liga ao seu recetor na superfície dos pré-osteoclastos permitindo a diferenciação deste no osteoclasto maduro. A presença de OPG irá alterar o rácio de diferenciação dos osteoclastos uma vez que estas também se ligam ao RANKL, impedindo assim a ligação do RANK ao seu recetor (Proffit et al., 2019).

### 2.2.3 Biomecânica do movimento dentário

O impacto dos aparelhos ortodônticos nos tecidos orais é avaliado através do estudo e análise das propriedades biomecânicas, tanto dos dispositivos como dos tecidos biológicos. Muitas vezes o efeito que os dispositivos ortodônticos exercem nos dentes é explicado através da aplicação das três *Leis de movimento de Newton* (English et al., 2015).

**1ª Lei de Newton (Lei da Inércia):** Qualquer corpo perseverará o seu estado de repouso ou de movimento uniformemente linear exceto quando é compelido a mudar o seu estado pela execução de forças externas.

**2ª Lei de Newton (Lei da Superposição de forças):** A taxa de variação do movimento de um corpo é diretamente proporcional à força impressa e é dirigida na direção em que a força atua.

**3ª Lei de Newton (Lei da Ação e Reação):** “Para qualquer ação existe uma reação igual e contrária”. Portanto quando A exerce uma força em B, B exerce simultaneamente uma força com a mesma magnitude e na direção oposta de A (Cohen & Smith, 2002).

De acordo com *Encyclopaedia Britannica*, um corpo está em equilíbrio se não for submetido a nenhuma aceleração linear ou angular e manter-se-á nessa condição indefinidamente até que uma força externa nele atue. Para um único corpo, o equilíbrio surge se a soma de todas as forças que nele atuam for zero, portanto um dente que realize um movimento de translação ou rotação pode estar em equilíbrio se a sua aceleração for constante. Se o conjunto de forças que atua num dente é ajustado de forma a cada força ser contrabalançada por outra igual mas de direção oposta, a aceleração será nula e o dente irá encontrar-se em equilíbrio. (Shellhart, 1995; English et al., 2015).

O LPD é capaz de resistir às forças aplicadas durante a função mastigatória pois são forças pesadas, na ordem de 1 a 2 kg, e intermitentes durando cerca de um segundo. Nestas forças de curta duração, o fluido tissular não se comprime e por isso o dente não chega a deslocar-se para dentro do espaço do LPD, portanto a força aplicada é transmitida ao osso alveolar que responde flexionando-se. A flexão óssea durante a função normal origina uma corrente pizoelétrica que estimula os mecanismos de reparação e regeneração óssea através dos quais o osso se adapta às funções requeridas (Proffit et al., 2019).

Contrariamente, forças leves e prolongadas, como a força aplicada pelos aparelhos ortodônticos conduzem ao aparecimento de dor e necrose dos elementos celulares do LPD tornando possível o movimento dentário. Por se tratar de uma força que é mantida por um período permite que fluido escoe para o espaço do LPD comprimindo-o contra o osso. Outras forças leves prolongadas também têm potencial para movimentar dentes, como é o caso da força exercida pelos lábios, bochechas e língua em repouso (Proffit et al., 2019).

### 2.2.3.1 Corpo

Os dentes podem ser considerados corpos rígidos uma vez que não mudam a sua forma sob a influência de forças. O ponto em que a massa do corpo se concentra e por onde a força aplicada ao corpo tem de passar para que este se mova em linha reta, designa-se centro de massa. Podemos determinar qual será o movimento do dente se conhecermos as forças que são aplicadas em relação ao seu centro de massa. (Marccotte, 2003).

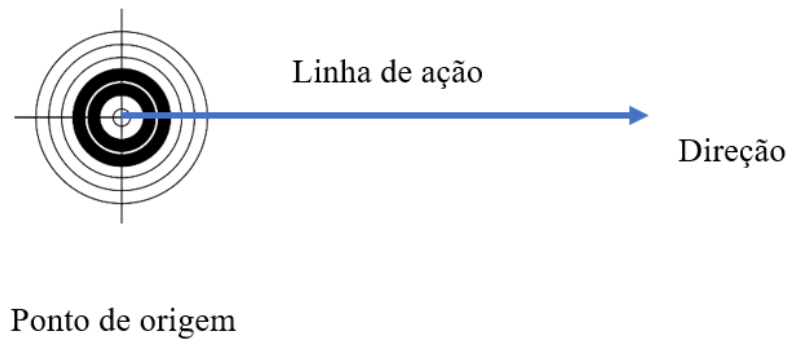
### 2.2.3.2 Centro de resistência

Teoricamente qualquer corpo livre tem o seu centro de gravidade, onde todo o seu peso se concentra e o corpo está em equilíbrio perfeito. Estando constrictos pelo periodonto e pelo osso alveolar, os dentes não são considerados corpos completamente livres e, portanto, ao invés de terem um centro de gravidade, têm um ponto análogo designado centro de resistência. Em ortodontia, o centro de resistência (*Cres*) do dente é o ponto onde se aplica uma força resultando num movimento de translação pura. Uma força que não passa no centro de resistência produz um movimento rotacional assim como um movimento linear. A posição do centro de resistência varia consoante o dente e depende também da altura do osso alveolar, mas geralmente, em dentes e periodonto normal, localiza-se a cerca de  $\frac{1}{3}$  a  $\frac{1}{4}$  da raiz do dente desde a JAC (Junção amelo-cimentária), ou, podemos também dizer que se encontra a meio da distância entre o ápex da raiz e a crista do osso alveolar (Smith & Burstone, 1984; Nanda & Kuhlberg, 1997; English et al., 2015; Proffit et al., 2019).

### 2.2.3.3 Força

Em física, a força é calculada multiplicando a *massa* (*m*) pela *aceleração* (*a*) de um corpo e quando é aplicada num corpo livre, pode fazer com que esse corpo altere a sua velocidade. A sua unidade de medida é *Newtons* (N) mas, em ortodontia muitas vezes é calculada em *gramas* (g) uma vez que a aceleração é clinicamente irrelevante para o cálculo da magnitude de uma força ( $1.0N = 100g$ ). É definida como a ação de um corpo sobre outro corpo que modifica ou tende a modificar a forma ou o movimento deste segundo corpo. A força pode ser representada por vetores (figura 1) que são caracterizados pela magnitude e direção; a intensidade/magnitude das forças é proporcional ao tamanho do vetor; o corpo do vetor indica a linha de ação e a seta indica

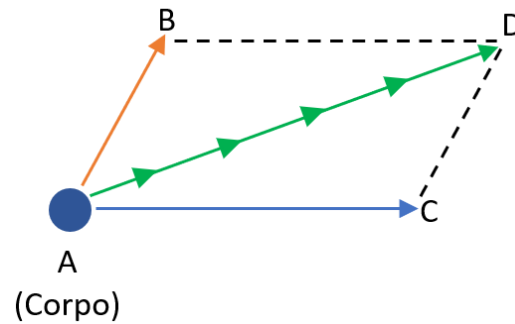
a direção da força. O ponto de origem da força é representado pela origem da seta e é o ponto de contacto entre o corpo e a força que está a ser aplicada. (Smith & Burstone, 1984; Nanda & Kuhlberg, 1997; Marcotte, 2003; English et al., 2015; Proffit et al., 2019)



**Figura 1** – Componentes de um vetor.  
(Adaptado de *Smith & Burstone*, 1984)

Se a linha de ação de uma força aplicada passar pelo centro de resistência do objeto, a força irá produzir um movimento de translação, em que todos os pontos do objeto se movem em igual distância na mesma direção. Se por outro lado, não passar pelo centro de resistência, irá produzir um movimento de rotação. Muitas vezes os nossos dentes estão sujeitos a mais do que uma força simultaneamente. O movimento do dente é determinado pelo conjunto de forças que nele atua e a combinação destas forças resulta numa só, designada *resultante* ( $r$ ) (figura 2). A resultante pode ser determinada através da representação do paralelogramo. (Smith & Burstone, 1984).

Em contexto ortodôntico, o sistema de forças que descreve todas as forças envolvidas e permite o cálculo da resultante de forças num dente ou conjunto de dentes, envolve uma variedade de elementos e inclui arcos ortodônticos, molas, cadeias elásticas e aparelhos extra orais (English et al., 2015).



**Figura 2**– Paralelogramo de forças – A força resultante das forças AB (que atua no sentido AB) e AC (que atua no sentido AC) atua no sentido AD, tem magnitude proporcional ao segmento AD e está representada pela seta verde. (Adaptado de *Marcotte*, 2003)

#### 2.2.3.4 Momento da força

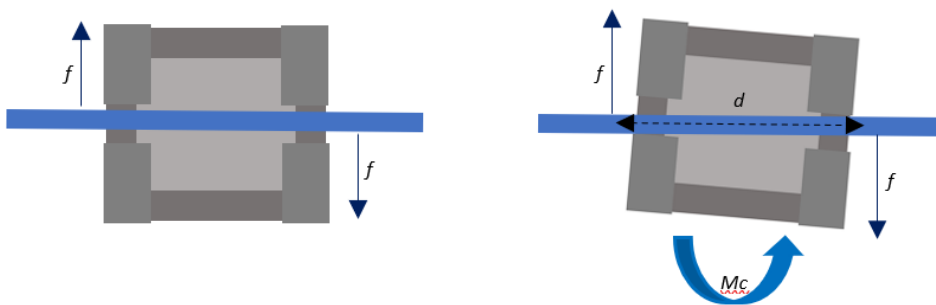
Um momento de uma força é obtido através da equação  $M = F \times d$  em que  $M$  corresponde ao momento,  $F$  representa a magnitude da força e  $d$  é a distância perpendicular entre a linha de ação de força e o centro de resistência. A unidade de medida do momento no Sistema Internacional (SI) é *Nm (Newton Meter)* mas é comumente medida em *g/mm* e representa-se por uma seta curva. Esta seta será desenhada, em diagramas bidimensionais, no sentido horário quando definidos como positivos e no sentido anti-horário quando estabelecido como negativo. Um momento é obrigatoriamente gerado se a linha de ação da força aplicada não passar pelo centro de resistência do corpo (Smith et al., 1984; Proffit et al., 2019).

#### 2.2.3.5 Momento de um binário

Um binário é composto por duas forças não coplanares de igual magnitude mas de direção oposta que atuam num corpo. Como resultado da aplicação destas duas forças surge um momento puro uma vez que o efeito de translação de ambas se anula mutuamente. A magnitude do momento do binário ( $Mc$ ) é igual à magnitude da componente das forças ( $f$ ) multiplicadas pela distância ( $d$ ):  $Mc = f \times d$  (English et al., 2015; Proffit et al., 2019).

O momento de um binário num aparelho ortodôntico fixo (figura 3) resulta da deflexão do arco ortodôntico contra o *bracket* produzindo um binário no *bracket* e no

dente. Quando uma força é aplicada no dente, produz um momento da força ( $Mf$ ) que tende a rodar o dente no sentido contrarrelógio. À medida que o conjunto dente/*bracket* se inclina relativamente ao arco, causa a deflexão deste e cria um binário no sentido horário, em que  $Mc$  é igual força aplicada multiplicada pela distância mesio-distal do *bracket* ( $d$ ). Consoante a inclinação do *bracket* aumenta relativamente ao arco,  $Mc$  também aumenta até, eventualmente, atingir uma magnitude equivalente a  $Mf$  com direção oposta. Ao alcançar este ponto, ambos os momentos se cancelam simultaneamente resultando numa rede de forças nula (English et al., 2015).



**Figura 3** – Momento de uma força resultante da interação do conjunto dente/*bracket* com o arco ortodôntico. (Adaptado de English et al., 2015)

### 2.2.3.6. Centro de rotação

O centro de rotação (*Crot*) de um dente é o ponto à volta do qual cada dente roda. Não tem uma localização constante, pois é determinada pelo tipo de movimento a que o dente está sujeito e se, por exemplo, estiver localizado mais para apical relativamente ao centro de resistência (*Cres*), o ápex da raiz do dente irá movimentar-se na direção oposta da coroa do dente (Smith & Burstone, 1984; English et al., 2015).

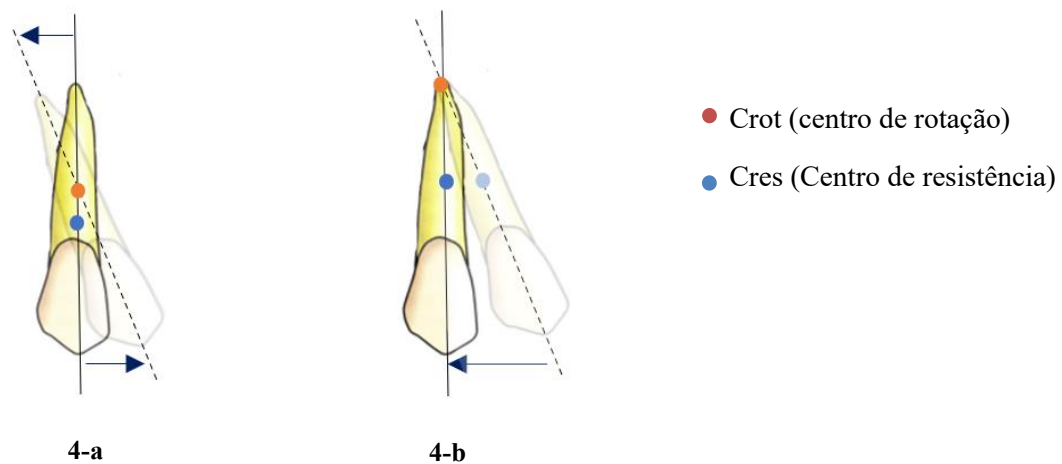
## 2.3 Movimentos ortodônticos

O estudo do mecanismo dos movimentos dentários é importante para perceber e antecipar a maneira como o dente vai reagir à força aplicada assim como para prever qual será o resultado da força empregue por um dispositivo ortodôntico específico. As bases do tratamento ortodôntico recaem sobre a aplicação clínica dos conceitos básicos de biomecânica vistos anteriormente.

O movimento dentário ortodôntico resulta da aplicação de forças produzidas pelos diversos dispositivos como os arcos, *brackets* ou elásticos que são inseridas e ativadas pelo médico ortodontista. A aplicação destas forças na coroa do dente introduz uma distribuição de forças no LPD, que até mesmo num dente monorradicular, é matematicamente complexa de analisar. A natureza desta distribuição e a complexidade geométrica do dente determina o padrão de reabsorção e aposição óssea (Haack & Weinstein, 1963; Nanda & Kuhlberg, 1997).

### 2.3.1. Inclinação

Um movimento de inclinação ocorre quando uma única força é aplicada sobre um dente. Pode ser classificada em inclinação não controlada (figura 4-a), quando o *Crot* se encontra entre o *Cres* e o ápex da raiz, e inclinação controlada (figura 4-b), quando o *Crot* se encontra no ápex da raiz (Nanda & Kuhlberg, 1997) (English et al., 2015).

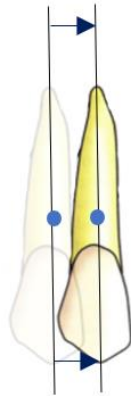


**Figura 4** – Diferentes tipos de inclinação consoante a localização do centro de rotação relativamente ao centro de resistência do dente. Inclinação não controlada (4-a) e inclinação controlada (4-b) (Adaptado de English et al., 2015).

### 2.3.2. Translação

Quando o ápex da raiz e a coroa do dente se movem numa mesma distância e na mesma direção horizontal, estamos perante um movimento de translação. Num caso de

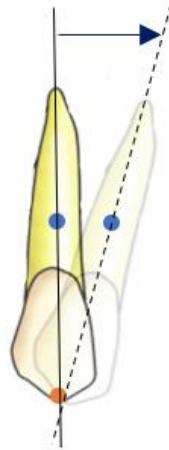
translação pura, o centro de rotação pode ser definido como estando no infinito (figura 5). Um movimento de translação resulta da aplicação de uma força horizontal no centro de resistência do dente, contudo, nos aparelhos ortodônticos convencionais, o bracket não se encontra no centro de resistência, por isso uma simples força horizontal não será suficiente para fazer uma translação pura do dente. Para atingir translação ao nível do bracket, é necessária a existência de um binário para criar um momento de igual magnitude direção oposta ao momento original (Haack & Weinstein, 1963; Smith et al., 1984; Proffit et al., 2019).



**Figura 5** - Movimento de translação dentária no qual o centro de rotação está localizado no infinito. (Adaptado de *English et al., 2015*).

### 2.3.3. Torque

Em ortodontia, o movimento de torque ocorre quando há movimentação da raiz mas a coroa fica praticamente no mesmo sítio. A raiz sofre uma rotação que, ao invés de ocorrer em torno do centro de resistência, o eixo é na coroa do dente, mais precisamente no bordo incisal (figura 6). É importante ligar o dente que queremos impor torque aos dentes adjacentes, de forma a evitar que se mova na direção oposta à pretendida. Este tipo de movimento radicular requer a aplicação de uma força elevada, o que provoca um elevado nível de stress ao nível do periodonto que é mais elevado ao nível do ápex. Quando se pretende mover a raiz dos incisivos para lingual, é aplicada uma força dirigida no sentido anterior que pode causar o deslocamento dos dentes posteriores também para anterior. Para evitar este efeito é aconselhado a utilização de um dispositivo de tração extra-oral ou outro tipo de força em direção distal (Nanda & Kuhlberg, 1997; English et al., 2015).



**Figura 6** – Movimento de torque. O centro de rotação está localizado no bordo incisal. (Adaptado de *English et al.*, 2015)

#### 2.3.4. Rotação

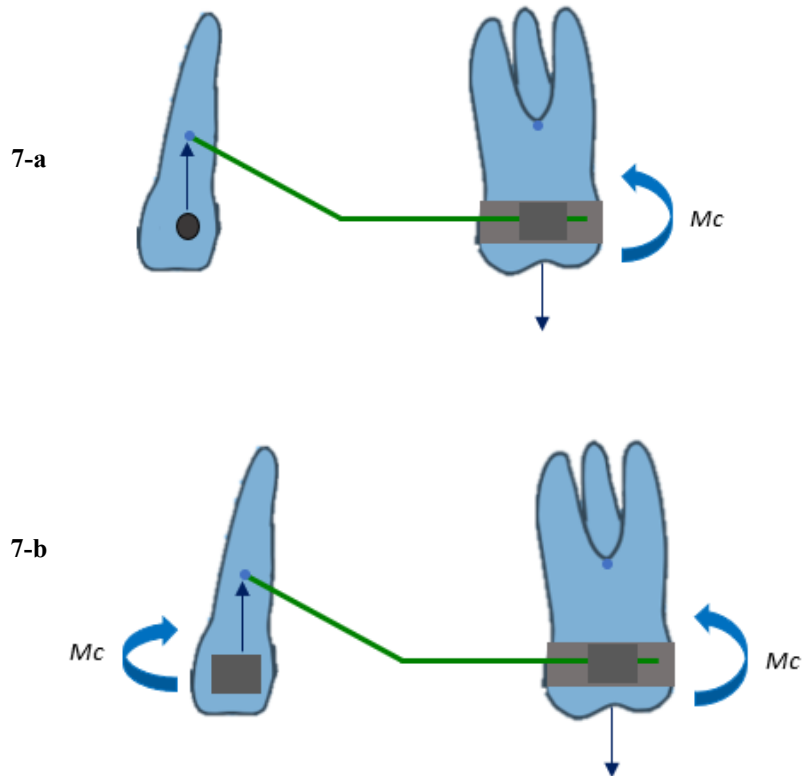
O movimento é considerado rotação pura quando ocorre em torno do seu longo eixo. Não há um conjunto de forças a serem aplicadas no centro de resistência, existe apenas um binário e portanto apenas ocorre rotação. A força é distribuída ao longo de todo o ligamento periodontal e, teoricamente, existem apenas zonas de tensão mas, na prática, há sempre zonas de compressão (Nanda & Kuhlberg, 1997; Proffit et al., 2019).

#### 2.3.5. Intrusão e extrusão

A intrusão é um tipo de translação que decorre na direção axial em que o centro de rotação também se encontra numa localização infinita. A extrusão, tal como a intrusão, também é um movimento vertical que ocorre através do longo eixo do dente, mas no sentido coronal.

Num aparelho ortodôntico fixo, o movimento de intrusão pode ser considerado um sistema de forças de um único binário, onde há dois pontos de ação com capacidade para exercer força mas apenas um gera um binário, ou de dois binários, onde ambos os pontos de ação geram um binário. No sistema de um único binário (figura 7-a), o arco de intrusão está introduzido no bracket ou tubo do molar (que é normalmente o segmento de estabilização deste tipo de movimento) e a outra ponta do arco está presa ao dente anterior ou segmento de dentes anteriores que pretendemos intruir. Isto dá origem a um único momento de um binário no molar e são aplicadas forças intrusivas no(s) dente(s)

anterior(es) e forças extrusivas no molar. O molar sofre então uma rotação no sentido anti-horário, mas, como o molar extrui e o anterior intrui, o conjunto do movimento em si resulta numa rotação no sentido horário (Marcotte, 2003; English et al., 2015; Proffit et al., 2019).



**Figura 7**– Movimento de intrusão de um dente anterior. Sistema de forças de um binário (7-a) e sistema de forças de dois binários (7-b). (Adaptado de *English et al.*, 2015)

No sistema de dois binários (figura 7-b), o arco está inserido tanto no bracket/tubo do dente posterior como no bracket do dente anterior. Neste caso, o momento da força intrusiva pode causar a inclinação da coroa do incisivo para vestibular, por isso, para prevenir tal inclinação é necessário aplicar uma força para retrainer o incisivo criando um momento na direção oposta. Isto pode ser alcançado prendendo o arco de forma a este não se mover mesialmente dentro do tubo do molar ou, podemos criar uma dobra no arco de forma a provocar torque do dente anterior no sentido lingual (English et al., 2015; Proffit et al., 2019).

### 2.3.6. Ancoragem

Ao serem submetidos ao stress e movimentação ortodôntica, os dentes sofrem sempre uma força recíproca com a mesma magnitude e de direção sempre oposta. Estas forças recíprocas não devem ser ignoradas e devem ser geridas de maneira a limitar qualquer movimento dentário indesejado. A capacidade de resistir a estes movimentos dentários reativos indesejados é conhecida como ancoragem ortodôntica e pode ser conseguida através de estratégias extra-orais e intra-orais. A primeira engloba ancoragem cervical, occipital e facial; a ancoragem intra-oral, por sua vez, divide-se em intramaxilar e intermaxilar e estas podem ainda subdividir-se em simples, estacionária ou recíproca (Freeman, 1965; Feldmann & Bondemark, 2006; Proffit et al., 2019).

Na ancoragem simples, um dente (ou conjunto de dentes) com maior suporte no osso alveolar é usado para mover outro de menor suporte e, se o dente utilizado como âncora não conseguir resistir à força do dente a ser movido, irá sofrer inclinação. Entende-se por ancoragem estacionária, um sistema de ancoragem concebido de maneira ao dente destacado como âncora não sofrer qualquer inclinação. No movimento dentário recíproco, as forças aplicadas são iguais (mas direções opostas) assim como a distribuição da força no LPD. Como tal, um bom exemplo deste tipo de ancoragem é o encerramento de diastema entre os incisivos centrais através de uma mola ativa. Uma vez que os dentes são teoricamente iguais, a distribuição das forças pelo LPD será a mesma e assim os dentes vão mover-se a mesma distância em direção ao outro (Freeman, 1965; Proffit et al., 2019).

O conceito de *valor de ancoragem* diz respeito à resistência de cada dente para resistir ao movimento dentário e depende da área da superfície radicular que é a mesma ocupada pelo LPD. Logicamente os dentes posteriores têm um valor de ancoragem superior aos dentes anteriores como está descrito na Tabela 1, e, portanto, numa situação de colocação de uma mola num local de extração (ou ausência) dos primeiros pré-molares, opondo o incisivo central, o incisivo lateral e o canino contra o segundo pré-molar e o primeiro molar iria resultar num movimento dentário recíproco. Contudo, o movimento do segmento anterior iria ser maior uma vez que a soma das áreas ocupadas pelo LPD dos dentes do segmento posterior é ligeiramente superior à do segmento anterior (Proffit et al., 2019).

	<b>Incisivo Central</b>	<b>Incisivo Lateral</b>	<b>Canino</b>	<b>Segundo Pré-molar</b>	<b>Primeiro Molar</b>	<b>Segundo Molar</b>
<b>Superior</b>	23.0	19.4	28.2	25.4	53.3	45.0
<b>Inferior</b>	17.0	20.0	27.0	24.0	47.5	45.0

**Tabela 1** – Valor de ancoragem em mm quadrados. O valor atribuído a cada dente é aproximadamente igual à área da superfície radicular de cada um. (Adaptado de *Freeman*, 1965)

Existem dispositivos biocompatíveis temporários de ancoragem (*TADs*), tais como microimplantes ou miniplacas, que são inseridos no osso com o intuito de alcançar ancoragem o mais perto possível de estacionária. Estes dispositivos são mantidos durante o tratamento e removidos após cumprirem a sua função. Uma vez que os *TADs* não se movem em resposta ao sistema de forças, a resposta biológica que ocorre em reação ao sistema de forças é diferente de quando é aplicada em dentes naturais e, por isso, o uso deste tipo de estratégia não tem qualquer impacto no sistema de forças (English et al., 2015).

## 2.4 Alinhadores transparentes

### 2.4.1 Materiais

Uma grande variedade de materiais termoplásticos (tabela 2) compostos à base de polímeros como polietileno, polipropileno e poliuretano, tem vindo a ser usada para fabricar alinhadores. São termoformados sobre um modelo de gesso ou são impressos tridimensionalmente. Os polímeros são materiais com alta viscosidade, relativamente baratos e de importância comparável aos metais. É necessário conhecer as propriedades mecânicas dos materiais termoplásticos uma vez que estas são influenciados por fatores como a humidade, temperatura, pressão e, por isso, estão dependentes das condições sob as quais são sintetizados e as condições de uso. Inúmeros estudos foram conduzidos com o intuito de comparar as propriedades químicas e mecânicas de vários materiais que constituem os aparelhos de diferentes marcas (Nielsen & Dekker, 1975; Proffit et al., 2019).

## A. Estrutura e Constituição

Estruturalmente, os materiais plásticos compostos por polímeros, podem ser classificados como amorfos (PC, PETG, A+, PUR) ou cristalinos (PP, C+, PE, EVA). Os plásticos amorfos são maioritariamente transparentes enquanto os cristalinos são opacos devido à mistura de polímeros cristalinos e amorfos com diferentes índices de refração. As diferenças nas características dos materiais podem ser atribuídas às diversas estruturas e pesos moleculares ou ao efeito da termoformação nos materiais. O rápido arrefecimento dos materiais termoplásticos sob os modelos de pedra/gesso pode alterar a orientação molecular, o peso molecular médio e o stress residual (Ryokawa et al., 2006; Alexandropoulos et al., 2015).

Código	Nome do Produto	Componente
EVA	Bioplast	Copolímero de Acetato-vinil de Etileno
PE	Copyplast	Polietileno
PETG	Duran	Polietileno Tereftalato Glicol
PP	Hardcast	Polipropileno
PC	Imprelon	Policarbonato
A+	Essix	Copoliéster
C+	Essix	Copolímero polipropileno/etileno (>95%) + estabilizadores (<5%)
PUR	Invisalign	Poliuretano de metileno difenil diisocianato e 1,6-hexanediol + aditivos

**Tabela 2** – Componentes e nomes comerciais de alguns materiais que compõem os alinhadores ortodônticos. (Adaptado de Ryokawa et al., 2006).

Em 2015, Alexandropoulos e colaboradores demonstraram que os polímeros à base de *poliuretano* (PUR) têm uma maior dureza, maior módulo de indentação e maior índice de elasticidade ( $\eta_{IT}$  – rácio tensão/deformação) mas uma menor resistência ao deslocamento (ou *creep*) ( $C_{IT}$  – aumento da percentagem de profundidade de indentação sob uma carga constante durante um determinado período de tempo) do que os formados por *polietileno tereftalato glicol* (PETG). Portanto os aparelhos constituídos por poliuretano, com um elevado módulo de elasticidade, têm uma capacidade maior de

distribuição de forças sob uma tensão constante, mas por terem uma menor resistência ao deslocamento, são mais prováveis de deformar sob tensão constante e, conseqüentemente, atenuar a força ortodôntica aplicada (Alexandropoulos et al., 2015).

## **B. Espessura**

Os alinhadores ortodônticos devem ser suficientemente flexíveis, para que seja possível a sua inserção e remoção, mas precisam de ser rígidos o suficiente para alterarem a posição dos dentes. Como tal, diversos estudos foram conduzidos para averiguar qual seria a dureza e espessura ideal para alcançar movimento dentário. Num estudo conduzido por *Hahn* e colaboradores (2009), foram comparadas as forças produzidas por dois materiais termoplásticos (*Erkodur* e *Biolon*) com duas espessuras diferentes num movimento de inclinação dentária. As conclusões relativamente à espessura e ativação dos materiais foram semelhantes às tiradas posteriormente por *Kohda* e colaboradores (2013) (Hahn et al., 2009; Cowley et al., 2012)

*Kohda* e colaboradores (2013) concluíram que a força ortodôntica tem uma forte correlação com a dureza e o módulo de elasticidade dos materiais, e que a espessura dos materiais tem uma grande influência nas forças produzidas pelos alinhadores. Assim, uma maior espessura e uma menor ativação correspondem a uma maior força ortodôntica (Kohda et al., 2013).

Comparado os dois estudos (*Hahn* e *Kohda*), foi ainda possível concluir, uma vez que foi usado um mesmo material (*Erkodur*) com a mesma espessura e ativação em ambos, que a força produzida para um movimento de inclinação é maior (5.1N) do que para um movimento de translação (2.91N) (Hahn et al., 2009; Kohda et al., 2013).

É ainda sugerido que, 10 dias após o uso contínuo de aparelhos termoformados constituídos por PETG, o ambiente intraoral não provoca alterações clinicamente relevantes na superfície oclusal do alinhador e não são afetadas as forças e momentos gerados por este, o que sugere uma boa estabilidade por parte do material (Bucci et al., 2019).

		Duran		Erkodur	
		0,5mm espessura	0,75mm espessura	0,5mm espessura	0,8mm espessura
Ativação	0,5mm	1.5N	2.8N	1.8N	2.9N
	1,0mm	1.2N	2.2N	1.3N	1.9N

**Tabela 3-** Forças (valores aproximados) produzidas por diferentes materiais termoplásticos consoante a espessura e ativação do material (Adaptado de *Kohda et al.*, 2013).

### C. Absorção de água

Através da humidade do ar e da imersão em água, os materiais compostos à base de polímeros absorvem água, o que resulta na sua expansão e alterações das propriedades mecânicas destes materiais. O encaixe dos aparelhos feitos com este tipo de material pode ficar comprometido devido à expansão higroscópica resultante do ambiente intra-oral húmido. *Ryokawa* e colaboradores (2006) conduziram um estudo experimental onde demonstraram que após serem submersos em água, ao fim de apenas uma hora, o material expande e, ao fim de duas semanas, a expansão linear com absorção de água rondava taxas de 100.3 a 119.9%. De uma forma geral, os materiais amorfos têm uma maior taxa de absorção de água e expansão higroscópica quando comparados com os materiais cristalinos (*Ryokawa et al.*, 2006).

### D. Temperatura

A termoformação também pode alterar as propriedades dos polímeros e, após serem submetidos a temperaturas de 23°C a sua espessura diminui, pelo que as dimensões de cada material se reduzem em taxas de intervalo de 74.9 a 92.6% da sua espessura inicial. Nos materiais amorfos, com exceção do PUR, temperaturas entre os 23 e os 37°C provocam um aumento significativo do módulo de elasticidade após a termoformação (23°C). Por outro lado, os materiais opacos, com exceção do C+ mostraram uma redução no módulo de elasticidade após a termoformação (23°C) (*Ryokawa et al.*, 2006).

## 2.4.2 Princípios

Os alinhadores transparentes reemergiram na última década do século *XX*, na Califórnia (EUA) numa empresa denominada Align Technology© onde surgiu o modelo pioneiro Invisalign®. Posteriormente, foram distribuídos para vários países europeus e atualmente existem diversas marcas fabricantes deste tipo de aparelhos. (Putrino et al., 2021).

A técnica dos alinhadores é considerada uma prática ortodôntica de sucesso devido à sua tecnologia tripartida. Começa por uma documentação pré-tratamento minuciosa, com modelos de estudo/scan, radiografia panorâmica, estudo cefalométrico e registo fotográfico. Após a recolha, é feita uma avaliação cuidada e é concebido um plano de tratamento detalhado pelo clínico. Todos os dados são enviados para a empresa fabricante que traduz o plano em movimentos dentários virtuais. O clínico tem a possibilidade de fazer alterações ilimitadas no programa eletrónico, adequando o tratamento ao seu paciente. (Joffe, 2003).

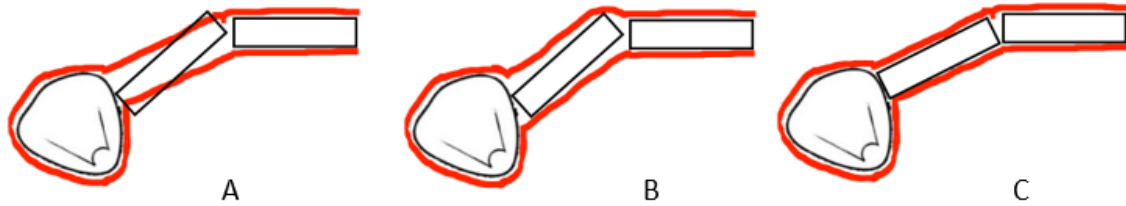
Um tratamento baseado em alinhadores requer que os pacientes usem sequencialmente alinhadores encaixados na sua dentição. Cada alinhador é desenhado de maneira a formar uma incompatibilidade geométrica com a posição real dos dentes. Esta falta de compatibilidade induz um sistema de forças tridimensional que se distribui ao longo das superfícies de contacto e que faz alterar a posição dos dentes para a desejada (figura 8). O plano é individualizado para cada paciente tendo por base as condições diagnosticadas previamente e são definidas as propriedades de cada alinhador: propriedades mecânicas do material polimérico, a espessura do alinhador, quantidade de ativação e a integração de elementos auxiliares ou não (Barone et al., 2016).

É feita uma distinção entre aparelhos termoformados por vácuo e por alta pressão. São ambos formados por pressão, mas os formados por vácuo são submetidos a pressões atmosféricas de 15 PSI (*pounds per square inch*). Nos outros sistemas, a bomba de pressão consegue alcançar até 100 PSI, resultando num maior detalhe no interior dos alinhadores. Quanto mais detalhada for a superfície interior do aparelho, melhor é a adaptação à arcada dentária e maior é a força gerada (Kohda et al., 2013; Nahoum, 2014).

O tratamento com alinhadores transparentes não se resume apenas ao uso dos alinhadores em si. Em movimentos de maior complexidade, como alterações interarcada ou para realizar ancoragem é necessário recorrer a vários elementos como *attachments* como *pressure points*, *power ridges* (ajudam no controlo lingual dos dentes) ou *bite ramps*. Podem ainda ser incorporados outro tipo de recursos, que também encontramos nos aparelhos convencionais, de forma a otimizar os resultados do tratamento, como o uso de elásticos intermaxilares, botões linguais, dispositivos temporários de ancoragem, entre outros (Weir, 2017).

A criação de *attachments* surgiu para que, ao aplicar a força do alinhador nos dentes, sejam produzidos vetores de forças adicionais que transformem a resultante das forças aplicada em cada dente e, conseqüentemente, permitam movimentos dentários mais complexos. Foram inicialmente apresentados como estruturas simples de configuração geométrica retangular (dimensões de 1 x 3 mm) aderidas à face vestibular dos incisivos mandibulares com intuito de reduzir a inclinação dos dentes adjacentes a um local de extração. Assim, à medida que o dente adjacente começa a inclinar, o attachment ao contactar com o alinhador produz um binário de forças que anula o momento inicialmente gerado apenas pelo alinhador, produzindo assim o movimento de translação ao invés de um movimento de inclinação (Arango, 2011).

É de realçar que os *attachments* não são elementos ativos, no sentido em que não produzem forças, são elementos passivos que obstruem de certa forma o material do alinhador à medida que este se deforma elasticamente devido à falta de compatibilidade entre a posição do dente e o material do alinhador. Desta forma, os *attachments* estabelecem um novo vetor de força que irá conduzir o dente à posição desejada. A geometria, posição e tamanho são aspetos a ter em conta aquando da escolha da melhor opção de design do *attachment* em cada situação clínica, visto que diferentes geometrias afetam significativamente a intensidade e direção das forças geradas (Arango, 2011; Costa et al., 2020).



**Figura 8** – Sequência de deformação elástica do alinhador e ativação de forças consequentes. Incompatibilidade entre alinhador e dente (A); Ativação e deformação do material (B); Alinhamento dentário após a sequência de alinhadores (C). (Adaptado de *Arango*, 2011)

Relativamente à retenção do aparelho e capacidade de remover o mesmo, estudos recentes afirmam que quanto maiores forem as margens do alinhador, mais difícil será a sua remoção e maior será a força de apertamento. A localização e anatomia dos *attachments* terá logicamente implicação na força necessária para remover o alinhador. Uma margem linear 2mm acima do zénite dos dentes e a presença de *attachments* nos primeiros pré-molares foi considerado o design mais retentivo. Margens gengivais retas melhoram a retenção e capacidade de realizar movimentos mais complexos como o torque, contudo, reduzem a flexibilidade do aparelho. Assim, considera-se o local mais difícil de remover o alinhador por vestibular dos incisivos centrais e mais fácil por lingual dos molares, onde as forças de apertamento são menores (Cowley et al., 2012; Takara et al., 2022).

### 2.4.3 Movimentos realizados

Como sabemos, a adesão à correção dentária com alinhadores tem sido exponencial e, portanto, para responder à procura do público, têm surgido cada vez mais técnicas e estudos experimentais que tentam procurar elevar a eficácia destes aparelhos. Na próxima secção irá ser explorada a precisão dos alinhadores transparentes para cada movimento específico.

Para avaliar a precisão de cada movimento nos estudos analisados, foi utilizada a seguinte fórmula (figura 9) que compara a quantidade de movimento planeada digitalmente no plano de tratamento com o movimento realmente obtido.

$$\text{Precisão do movimento} = \frac{\text{pós tratamento real} - \text{pré tratamento inicial}}{\text{pós tratamento ideal} - \text{pré tratamento inicial}}$$

**Figura 9** – Fórmula da precisão do movimento. (Adaptado de *Lombardo et al.*, 2017)

### 2.4.3.1 Inclinação

Dados iniciais reportam uma precisão média de inclinação mesio-distal do segmento anterior de 40.5%, com os incisivos laterais superiores (43.1%) e inferiores (48.6%) com as maiores taxas de movimento e os incisivos centrais superiores (38.6%), caninos maxilares (35.5%) e mandibulares (26.9%) com as menores taxas. A inclinação da coroa no sentido lingual apresenta uma maior eficácia (53,1%) comparativamente à inclinação vestibular (37,6%) e esta diferença entre inclinação lingual e vestibular é mais significativa nos incisivos maxilares. Contudo, os resultados são subjetivos visto que, na amostra de 180 dentes, apenas 21 apontavam para um movimento superior a 1mm (alcance entre 1.0-3.8) e na amostra de 139 dentes apenas 39 procuravam uma inclinação vestibular superior a 5° (alcance 5.0°-14.7°) (Kravitz et al., 2009).

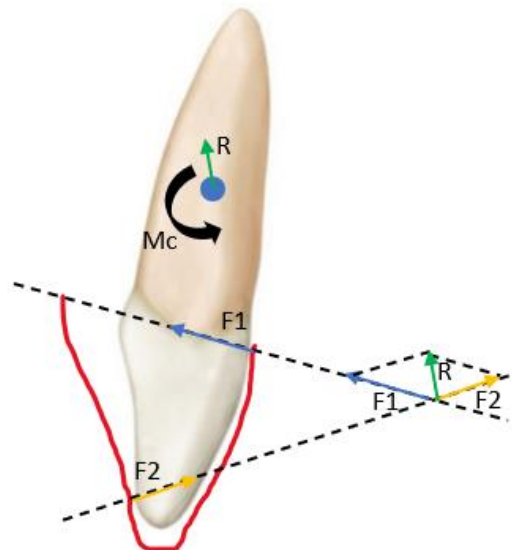
Em 2017, os valores de precisão média de inclinação mesio-distal aumentaram para 82.5%, uma vez que neste estudo foi avaliado também o movimento no segmento posterior onde a inclinação mesio-distal dos molares superiores (93.4%) e pré-molares inferiores (96.7%) foram considerados os movimentos mais previsíveis. De uma forma geral, não foram apontadas diferenças estatisticamente significativas entre os valores previstos e a quantidade de movimento alcançada (Lombardo et al., 2017).

O mais recente estudo que concerne a este tipo de movimento ortodôntico, valida os resultados do anterior, afirmando não terem sido encontradas diferenças estatisticamente significativas entre o grau de inclinação previsto e o grau alcançado na inclinação mesio-distal de qualquer dente, com o auxílio de *attachments* e/ou elásticos de classe II ou III e, com a utilização dos dispositivos no mínimo 22 horas por dia. No entanto contradiz o estudo de *Lombardo* (2017) que concluiu que a inclinação do segundo molar foi a que apresentou um maior desvio do valor requerido, justificando tais resultados pela dificuldade acrescida de mover dentes com coroas clínicas curtas (D'Antò et al., 2022).

### 2.4.3.2 Torque

Para controlar o movimento da raiz de um incisivo central superior é necessário a criação de um binário (figura 10). A deflexão reversível do alinhador aplica uma força de inclinação ( $F_1$ ) junto da margem gengival na face vestibular do dente e, consequentemente, é gerada uma outra força ( $F_2$ ), de direção oposta, produzida pelo movimento do dente contra a face interna palatina do alinhador, junto ao bordo incisal. Da junção destas duas forças, surge uma força resultante ( $R$ ) obtida através do paralelogramo de forças (Hahn et al., 2010).

Para que haja espaço para o dente se mover para o local pretendido, inicialmente, cada alinhador não encaixa perfeitamente na coroa dentária, ou seja, não está em contacto íntimo com todos os pontos da coroa. Consequentemente, com esta falta de ajuste, a força produzida junto do bordo incisal é perdida e assim o binário é ineficaz. Por isso o movimento de torque controlado é difícil de atingir. Uma deflexão de 0.8mm durante o torque associa-se a um maior afastamento entre as faces do dente e as faces internas do alinhador, impedindo a criação de um binário e, por conseguinte, não ocorre movimento radicular, mas sim um movimento inicial de inclinação na direção da força inicial (Hahn et al., 2010; Tepedino et al., 2018).



**Figura 10** – Binário necessário para executar o movimento de torque palatino. Representação do momento ( $M_c$ ) criado pelas forças aplicadas pelo alinhador.  $F_1$ - força inicial;  $F_2$ - força criada em resposta ao movimento dentário consequente a  $F_1$ ;  $R$ - resultante de forças obtidas através do paralelogramo de forças (Adaptado de Hahn et al., 2010).

Pode ser alcançado cerca de 1° de torque por cada alinhador com a ajuda de elementos auxiliares como *attachments* e *power ridges*, com uma precisão média de movimento de 51.5% e 49.1%, respetivamente. No entanto, o uso de *power ridges* mostrou-se menos eficaz no controlo do torque de dentes anteriores, pelo que se aconselha a utilização de *attachments* horizontais de forma elipsoidal (Simon et al., 2014). Outros autores, discordam e dizem ser possível mover a raiz de um incisivo central superior no sentido lingual com o uso de um *power ridge* na face vestibular junto à gengiva enquanto uma força é aplicada na face lingual perto do bordo incisal, não encontrando diferenças estatisticamente significantes entre a quantidade de torque obtido e a planeada (Hahn et al., 2010; Proffit et al., 2019).

De acordo com as informações recolhidas relativamente à eficácia do movimento de dentes anteriores é consensual que os alinhadores transparentes provocam um maior movimento da coroa do dente comparativamente ao movimento radicular, pelo que se conclui que, apesar de ser possível realizar torque da raiz, os alinhadores conseguem produzir principalmente movimento de inclinação da coroa (Simon et al., 2014; Zhang et al., 2015; Tepedino et al., 2018).

#### **2.4.3.3 Rotação**

Os alinhadores transparentes são capazes de atingir uma rotação de 2° em cada alinhador da sequência de tratamento. Na literatura existente, a rotação de um dente cilíndrico com alinhadores é considerada um dos movimentos mais difíceis de executar. Em 2007, a média de rotação alcançada pelos caninos era a menor, correspondendo a 29,1% nos mandibulares e 32,2% nos maxilares. Os incisivos superiores eram capazes de alcançar valores rondando os 50% do movimento inicialmente previsto, e conclui-se ainda, que rotações superiores a 15° faziam diminuir significativamente a eficácia deste movimento (Kravitz et al., 2009; Simon et al., 2014).

Existe uma discrepância de opiniões relativamente ao uso de *attachments* no auxílio do movimento de rotação dentário com alinhadores transparentes. Alguns estudos concluem que o número ou presença de *attachments* não contribui para a eficácia da rotação de um dente cilíndrico, inclusivamente, o aumento do número de *attachments* impede a correção da rotação e quantos mais *attachments* menor o grau de rotação

atingido. Quanto maior o número de *attachments* menor será a espessura do alinhador diminuindo e menor a sua retenção. A presença de vários *attachments* no mesmo quadrante pode dificultar a capacidade de deformação e adaptação do alinhador aos dentes. Outros afirmam que não existem diferenças clinicamente significativas entre o grau de rotação alcançado em caninos e pré-molares com e sem *attachments*. Mais recentemente um estudo concluiu que o uso de *attachments* aumenta a eficácia do movimento de rotação dentária e melhora a retenção do alinhador. Dados deste último, confirmam que um maior número de *attachments* mostra-se menos eficaz, sendo o uso de um único *attachment* a melhor opção, não ultrapassando 1.2° de ativação por alinhador para que seja possível um melhor controlo radicular e um menor stress periodontal (Simon et al., 2014; Momtaz, 2016; Cortona et al., 2020).

#### 2.4.3.4 Intrusão

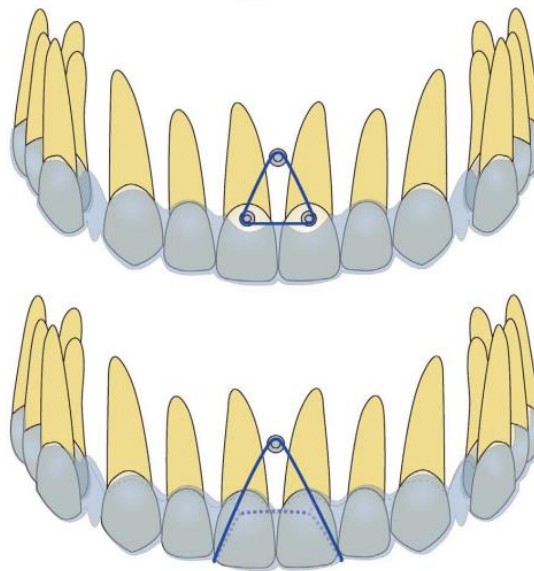
Dados de uma revisão sistemática realizada em 2014 comparando a posição final prevista de dentes intruídos com a posição realmente alcançada, afirmam que a precisão máxima de movimento alcançado foi de 45% e 47% nos incisivos centrais superiores e inferiores, respetivamente, e, a média total de intrusão foi de 0.72mm (Rossini et al., 2014).

Em 2018, o movimento de intrusão foi considerado um dos mais difíceis de alcançar conforme a previsão do sistema informático. Mais recentemente prevê-se que seja possível alcançar 51,19% da intrusão dos dentes anteriores apenas com a presença de *pressure points* localizados no cingulo lingual dos incisivos, sem que seja necessário o uso de *bite ramps*. O incisivo lateral superior é o dente que consegue atingir maior percentagem do movimento previsto (58,12%, correspondendo a 1,1mm) e os incisivos inferiores os que alcançam menor percentagem (44,71%, correspondendo a 0,8mm). Assim, a média de valores de intrusão dos incisivos é de 48,81% o que corresponde a cerca de 0,9mm (Charalampakis et al., 2018; Al-balaa et al., 2021).

Em casos de má oclusão de mordida aberta, opta-se frequentemente por auxiliar a intrusão dos dentes posteriores à extrusão dos anteriores. É possível aos alinhadores realizar intrusão molar pelo efeito *bite-block* onde são colocadas duas camadas do material do alinhador na zona posterior, e o seu uso durante 22 horas/dia por 18-24 meses,

consegue desencadear uma ligeira autorrotação da mandíbula melhorando casos de mordida aberta (Giancotti et al., 2017).

Num outro estudo publicado em 2021 experimentou-se a utilização de um mini-implante por vestibular com duas opções de utilização de elásticos: botões localizados nos incisivos centrais superiores com auxílio de elásticos vestibulares; e elásticos a unir um mini-implante por vestibular e cortes de precisão por palatino do alinhador (figura 11). No mesmo concluiu-se que, na primeira opção, era possível alcançar intrusão dos incisivos e torque das raízes dos centrais no sentido palatino, mas causando inclinação mesial dos incisivos centrais. Já com elásticos por palatino era possível alcançar intrusão dos incisivos e torque palatino da raiz eficazmente, diminuindo até a possibilidade de mordida aberta anterior. Apesar destas técnicas serem mais eficazes na retração incisiva superior no tratamento de mordida profunda, podem apresentar desvantagens como uma maior reabsorção radicular e defeitos alveolares, principalmente no caso dos elásticos por vestibular (Liu et al., 2021).



**Figura 11** – Uso de mini-parafusos na intrusão dos incisivos centrais superiores. Elásticos e botões vestibulares (cima); elásticos palatinos (baixo). (Retirado de *Liu et al.*, 2021)

#### 2.4.3.5 Extrusão

O movimento de extrusão apresenta-se como o movimento que menos consegue alcançar a posição final prevista, o que pode estar relacionado com a dificuldade do material em se deformar no sentido vertical. Frequentemente recorremos ao movimento de extrusão de dentes anteriores em casos de mordida aberta. Em 2014, a literatura reunida afirmava que, em média, apenas 30% do movimento previsto era alcançado, sendo os incisivos maxilares (18%) e mandibulares (25%) os dentes com menor percentagem de precisão neste tipo de movimento (Kravitz et al., 2009; Rossini et al., 2014; Giancotti et al., 2017).

A extrusão de um incisivo central superior apenas é conseguida na presença de *attachments*. Comparando a utilização de um *attachment* retangular palatino (2.0mm x 4.0mm x 1.5mm) com um retangular vestibular (2.0mm x 4.0mm x 1.5mm) e um elipsoidal vestibular (2.5mm x 4.0mm x 1.5mm), o primeiro mostrou-se o mais eficaz na extrusão deste dente. Mas, neste caso específico, mais importante ainda que a forma geométrica, consideraram a posição do *attachment* (mais incisal ou mais cervical) o aspeto mais relevante para obter um melhor resultado (Savignano et al., 2019).

#### 2.4.3.6 Distalização

O movimento de distalização superior é maioritariamente requerido em casos de má oclusão classe II onde se procura colocar os dentes maxilares numa posição mais posterior de modo a obter uma intercuspidação molar e canina normal, sem que seja necessário extrair pré-molares. As estratégias convencionalmente utilizadas para alcançar este tipo de movimento compreendem o uso de aparelhos extra-orais de tração cervical ou aparelhos *pendulum*. Apesar de terem sido provadas como eficazes, este tipo de abordagens apresenta algumas desvantagens. No caso dos aparelhos *pendulum*, por exemplo, é necessário tomar cuidados relativamente à deslocação mesial dos pré-molares e à inclinação distal das coroas dos molares. Os dispositivos de tração cervical podem provocar um aumento da altura facial e da dimensão esquelética. (Fuziy et al., 2006; Lione et al., 2015; Doruk et al., 2016).

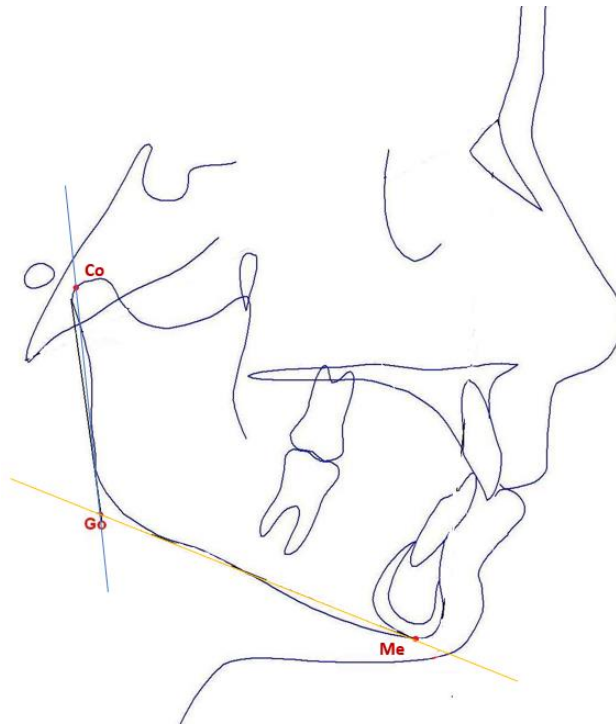
Estudos conduzidos por *Simon* (2014) e *Ravera* (2016) e colaboradores provaram que através da terapia com alinhadores transparentes associada com *attachments* e

elásticos de classe II em pacientes adultos consegue-se obter uma distalização molar através da translação destes dentes. No primeiro estudo provou-se que era possível distalizar de forma controlada os molares superiores cerca de 1.5mm com o auxílio de *attachments*. No estudo posterior comprovou-se a possibilidade de distalizar os primeiros molares maxilares cerca de 2.25mm e cerca de 2.52mm os segundos molares sem que ocorram movimentos verticais ou de inclinação da coroa significativos e sem revelar alterações na altura facial. Para que tal aconteça, é necessária a utilização de attachments retangulares e verticais na face vestibular dos dentes molares para contrariar o movimento de inclinação distal da coroa (Simon et al., 2014; Ravera et al., 2016).

A densidade óssea alveolar tem um efeito sobre o grau e duração de tensão da força ortodôntica na raiz dentária pelo que distalização molar inferior apresenta-se como um desafio para os ortodontistas devido à grande densidade óssea e morfologia radicular dessa região. Algumas abordagens para este tipo de movimento são o uso de molas helicoidais em aparelhos fixos, elásticos interarcada e aparelhos *Lip Bumper*, as quais apresentavam desvantagens como a necessidade de adesão do paciente, inclinação dentária indesejada, perda de ancoragem e *flaring* dos incisivos. Em abordagens com alinhadores, pode ser alcançada distalização através de ancoragem com microimplantes ou miniplacas. Técnicas com TADs melhoraram alguns destes aspetos, tendo como desvantagens apenas o facto de se tratar de uma técnica clinicamente invasiva e, por vezes poder ocorrer a perda de fixação do implante se for exercida uma força muito elevada para movimentar estes dentes. (Sugawara et al., 2004; Iglesias-Linares et al., 2016; Rota et al., 2022).

Num estudo realizado em 2022 com o objetivo de averiguar a eficácia dos alinhadores no movimento de distalização molar inferior em adultos, todos os pacientes alcançaram uma relação de classe I num espaço de cerca de 19.7 meses. Apesar de não terem sido reportadas alterações esqueléticas sagitais ou verticais significativas, nem de *overjet* ou *overbite*, foram detetadas mudanças na inclinação do primeiro molar inferior de  $-4.56^\circ$  relativamente à linha Co-Go (figura 12) e  $-5.03^\circ$  relativamente à linha Go-Me, enquanto o segundo molar demonstrou inclinação de  $-4.47^\circ$  relativamente à linha Go-Me. Foi ainda notada uma retroinclinação dos incisivos inferiores relativamente à linha Go-Me. Assim, os aparelhos transparentes são eficazes na distalização molar inferior mas causam maioritariamente um movimento de inclinação ao invés de um movimento de

translação distal. Contudo, é possível alcançar uma relação dentária correta pois observa-se uma diminuição de 2.47mm da distância entre o ponto central da face oclusal do segundo molar e a linha Co-Go e uma diminuição de 1.16mm para o primeiro molar, sendo estes valores considerados clinicamente significativos. É pertinente salientar a importância do uso de elásticos classe III na fase de distalização molar inferior para prevenir a perda de ancoragem anterior (Rota et al., 2022).



**Figura 12** – Representação de alguns pontos e linhas cefalométricas. (Adaptado de Rota et al., 2022)

#### 2.4.3.7 Expansão

A expansão das arcadas é muitas vezes necessária em casos de apinhamento dentário para criar espaço para o alinhamento dentário e para corrigir algumas mordidas cruzadas. A correção deste tipo de mordida passa pela combinação de expansão e contração das arcadas, acerto de intercuspidação e até alteração de alguns hábitos deletéricos que possam influenciar a posição dos tecidos moles que, conseqüentemente, podem alterar a mordida. (Lee, 1999; Houle et al., 2017).

Publicações iniciais reportavam que os alinhadores conseguiam atingir uma

expansão de 2-4mm. Em 2017 e, uma vez que os alinhadores apenas conseguem alcançar expansão dento-alveolar em adultos, recomendou-se que a expansão não ultrapassasse os 3mm para diminuir o risco de recessão gengival e perda de suporte devido à proximidade do dente com a tábua externa óssea do osso alveolar (Ali & Miethke, 2012; Houle et al., 2017).

Zhou & Guo (2019), apresentaram uma percentagem de 36.35% de movimento atingido relativamente ao planeado para expansão da arcada com movimento de translação. Para atingir uma maior expansão e simultaneamente evitar grandes consequências no periodonto, muitas vezes os dentes posteriores são inclinados vestibularmente, pelo que a expansão ao nível das cúspides é maior que ao nível da margem gengival. Dados recolhidos em 2017 apontavam para uma percentagem de movimento alcançado de 72.8% do movimento previsto na maxila (82.9% nas cúspides e 62.7% nas margens gengivais) e 87.7% na mandíbula (98.9% nas cúspides e 76.4% nas margens gengivais) (Houle et al., 2017).

#### 2.4.4 Limitações

Para Bollen et al., (2003), a maior falha do tratamento com alinhadores removíveis prende-se com a dificuldade de concluir o caso com sucesso com o conjunto de alinhadores inicialmente planeado. Apenas 29% dos pacientes completaram o tratamento no tempo e número de alinhadores planeados e, os restantes necessitaram de um segundo conjunto de alinhadores ou de complementar com tratamento ortodôntico fixo. Pacientes com pontuação PAR (*Peer Assessment Rating*) baixa, sem extrações e com ativações a cada duas semanas são mais prováveis de concluir o tratamento com as condições inicialmente concebidas. (Bollen et al., 2003).

Outra situação apontada é a deformação do alinhador quando é acomodado na sua posição, dando origem a umas zonas de contacto com o dente e outras zonas onde existe um espaço entre ambos, o que reduz a eficácia dos alinhadores em produzir os movimentos planeados. Pelo que a grande maioria dos estudos concorda que há sempre, apesar de estatisticamente insignificante, uma discrepância, entre o planeamento digital e o resultado final real. Esta discrepância de valores difere dependendo do tipo de movimento realizado. (Tepedino et al., 2018).

O tratamento com alinhadores ortodônticos inicialmente parecia limitar-se a más oclusões ligeiras, como apinhamentos ou diastemas de 1 a 5mm, problemas de mordida profunda que pudessem ser resolvidos com intrusão dentária ou avanço incisivo, expansão das arcadas por meio de uma inclinação dentária limitada e alguns acabamentos após terapia ortodôntica convencional fixa. Foram apontadas situações difíceis de corrigir ou até mesmo dadas como situações contra-indicadas: (Womack et al., 2002; Phan & Ling, 2007).

- Apinhamento ou diastemas superiores a 5mm
- Discrepâncias esqueléticas antero-posteriores superiores a 2mm
- Dentes severamente rodados (mais de 20°)
- Extrusões complexas
- Translações de grandes distâncias
- Mordidas abertas superiores e anteriores
- Inclinação dentária severa (mais de 45°)
- Dentes com coroa clínica curta
- Arcadas com ausência de várias peças dentárias

Comparando índices PAR, alguns autores mostram que certas marcas de alinhadores abordam casos com valores mais baixos comparativamente aos aparelhos convencionais fixos. Outros não encontraram diferenças significativas entre os valores PAR obtidos em cada uma das técnicas. Esta diferença de opiniões/resultados obtidos num intervalo de mais de uma década reflete o desenvolvimento das técnicas com recurso a alinhadores (Djeu et al., 2005; Gu et al., 2017).

#### **2.4.5 Vantagens e desvantagens**

Alguns autores descrevem as mudanças das propriedades dos materiais durante o tempo de uso como uma limitação, pois o envelhecimento do material no ambiente intraoral pode alterar o resultado do tratamento. Modificações causadas pelo biofilme e pelas condições ambientais, afetam a estabilidade do material ao longo do tempo e, conseqüentemente, pode comprometer a eficácia do tratamento (Ryokawa et al., 2006; Papadopoulou et al., 2019).

Uma das desvantagens mais descritas na literatura prende-se com a colaboração dos pacientes. Autores aconselham que os pacientes devem utilizar o aparelho pelo menos 22 horas por dia, removendo apenas para comer, consumo de bebidas quentes que possam danificar ou manchar os alinhadores, e para a higienização oral (Kravitz et al., 2009; Lombardo et al., 2017; Weir, 2017).

Comparativamente aos aparelhos convencionais fixos, as vantagens dos alinhadores descritas são: uma melhor estética e conforto assim como uma melhor higiene e saúde periodontal; o número de emergências clínicas e o tempo de consulta também são menores e invoca o mínimo desconforto e não altera a dicção. Por outro lado, sabemos que o custo é mais elevado não só pelos materiais e tecnologia envolvidos, mas também pelo maior tempo despendido pelo médico no planeamento inicial. Contudo, alguns aspetos estão dependentes do profissional, pelo que a experiência do ortodontista irá determinar se o tempo e a eficácia do tratamento vão compensar o elevado custo dos materiais (Buschang et al., 2014; Weir, 2017; Proffit et al., 2019).



### 3 CONCLUSÃO

Para alcançar um resultado final de excelência com o uso de alinhadores, requer-se uma compreensão minuciosa dos princípios da ortodontia e da sua biomecânica a fim de estabelecer um diagnóstico de confiança e o plano de tratamento que melhor se adequa a cada caso.

Atualmente os alinhadores são considerados uma opção de tratamento que consegue alcançar resultados semelhantes a outras técnicas ortodônticas. Apesar de inicialmente terem sido recomendados para más oclusões ligeiras, o interesse crescente nesta tecnologia tem levado a inovações que a tornam indicada numa maior extensão de casos cada vez mais complexos.

São óbvias as vantagens dos tratamentos com alinhadores, como a estética, o conforto, o melhor controle da higiene e o menor tempo de consultas. Contudo, é necessário não esquecer que o sucesso do tratamento é altamente influenciado pelo tipo de material e a sua espessura, tipo de posição dos *attachments*, a quantidade de ativação de cada alinhador assim como a técnica de produção do mesmo, densidade e morfologia óssea, a anatomia dentária, o comprimento radicular, o sexo e idade dos pacientes, sem esquecer a colaboração do paciente e o *know how* do clínico.

Assim sendo, há necessidade de executar mais trabalhos científicos e estudos que comprovem a previsibilidade dos movimentos planeados, a sequenciação necessária e quais as técnicas auxiliares que ajudarão a tirar a máxima eficácia deste sistema.



#### 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, I. (2017). Altered passive eruption (APE) and active secondary eruption (ASE): differential diagnosis and management. *The international journal of esthetic dentistry*, 352-376.
- Al-balaa, M., Li, H., MA Mohamed, A., Xia, L., Chen, Y., Omran, T., Li, S., & Hua, X. (2021). Predicted and actual outcome of anterior intrusion with Invisalign assessed with cone-beam computed tomography. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 275-280.
- Alexandropoulos, A., Al Jabbari, Y. S., Zinelis, S., & Eliades, T. (2015). Chemical and mechanical characteristics of contemporary thermoplastic orthodontic materials. *Australian orthodontic journal*, 165-170.
- Ali, S. A., & Miethke, H. R. (2012). Invisalign®, an innovative invisible orthodontic appliance to correct malocclusions: Advantages and limitations. *Dental Update*, 254-260.
- Alikhani, M., Sangsuwon, C., Alansari, S., Nervina, J. M., & Nervina, J. M. (2018). Biphasic theory: breakthrough understanding of tooth movement. *Journal of the World Federation of Orthodontists*, 82-88.
- Arango, J. P. (2011). Current Biomechanical Rationale Concerning Composite Attachments in Aligner Orthodontics. Em *Principles and Biomechanics of Aligner Treatment* (pp. 13-25). Elsevier Health Sciences.
- Barone, S., Paoli, A., Razionale, A. V., & Savignano, R. (2016). Computational design and engineering of polymeric orthodontic aligners. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 1-15.
- Bollen, A. M., Huang, G., King, G., Hujoel, P., & Ma, T. (2003). Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 496-501.
- Bucci, R., Rongo, R., Levatè, C., Michelotti, A., Barone, S., Razionale, A. V., & D'Antò, V. (2019). Thickness of orthodontic clear aligners after thermoforming and after 10

- days of intraoral exposure: a prospective clinical study. *Progress in Orthodontics*, 1-8.
- Buschang, P. H., Shaw, S. G., Ross, M., Crosby, D., & Campbell, P. M. (2014). Comparative time efficiency of aligner therapy and conventional edgewise braces. *Angle Orthodontist*, 391-396.
- Charalampakis, O., Iliadi, A., Ueno, H., Oliver, D. R., & Kim, K. B. (2018). Accuracy of clear aligners: A retrospective study of patients who needed refinement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 47-54.
- Cohen, B., & Smith, G. E. (2002). *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Cortona, A., Rossini, G., Parrini, S., Deregibus, A., & Castroflorio, T. (2020). Clear aligner orthodontic therapy of rotated mandibular round-shaped teeth: A finite element study . *The Angle Orthodontist*, 247-254.
- Costa, R., Calheiros, F. C., Ballester, R. Y., & Gonçalves, F. (2020). Effect of three different attachment designs in the extrusive forces generated by thermoplastic aligners in the maxillary central incisor. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 46-53.
- Cowley, D. P., Mah, J., & O'Toole, B. (2012). The effect of gingival-margin design on the retention of thermoformed aligners. *Journal of clinical orthodontics*, 697-702.
- D'Antò, V., Bucci, R., De Simone, V., Ghislanzoni, L. H., Michelotti, A., & Rongo, R. (2022). Evaluation of Tooth Movement Accuracy with Aligners: A Prospective Study. *Materials*, 1-10.
- Djeu, G., Shelton, C., & Maganzini, A. (2005). Outcome assessment of Invisalign and traditional orthodontic treatment compared with the American Board of Orthodontics objective grading system. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 292-298.
- Doruk, C., Cankaya, O. S., & Guvenc, I. S. (2016). Non-Extraction Treatment of Skeletal Class II Adult Patient with Total Maxillary Arch Distalization. *Turkish Journal of Orthodontics*, 122-128.

- English, J. D., Akyalcin, S., Peltomäki, T., & Litschel, K. (2015). *Mosby's Orthodontic Review*. Elsevier.
- Feldmann, I., & Bondemark, L. (2006). Orthodontic anchorage: A systematic review. *Angle Orthodontist*, 493-501.
- Freeman, D. C. (1965). Root Surface Area Related to Anchorage in the Begg Technique. *Theses and Dissertations (ETD); University of Tennessee Health Science Center*.
- Fuziy, A., de Almeida, R. R., Janson, G., Angelieri, F., & Pinzan, A. (2006). Sagittal, vertical, and transverse changes consequent to maxillary molar distalization with the pendulum appliance. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 502-510.
- Giancotti, A., Garino, F., & Mampieri, G. (2017). Use of clear aligners in open bite cases: an unexpected treatment option. *Journal of Orthodontics*, 114-125.
- Gu, J., Tang, J. S., Skulski, B., Fields, H. W., Beck, F. M., Firestone, A. R., Kim, D. G., & Deguchi, T. (2017). Evaluation of Invisalign treatment effectiveness and efficiency compared with conventional fixed appliances using the Peer Assessment Rating index. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 259-266.
- Haack, D. C., & Weinstein, S. (1963). Geometry and mechanics as related to tooth movement studied by means of two-dimensional model. *Journal of the American Dental Association*, 157-164.
- Hahn, W., Dathe, H., Fialka-Fricke, J., Fricke-Zech, S., Zapf, A., Kubein-Meesenburg, D., & Sadat-Khonsari, R. (2009). Influence of thermoplastic appliance thickness on the magnitude of force delivered to a maxillary central incisor during tipping. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 12.1-12.7.
- Hahn, W., Zapf, A., Dathe, H., Fialka-Fricke, J., Fricke-Zech, S., Gruber, R., Kubein-Meesenburg, D., & Sadat-Khonsari, R. (2010). Torquing an upper central incisor with aligners - Acting forces and biomechanical principles. *European Journal of Orthodontics*, 607-613.

- Houle, J. P., Piedade, L., Todescan, R., & Pinheiro, F. H. (2017). The predictability of transverse changes with Invisalign. *Angle Orthodontist*, 19-24.
- Iglesias-Linares, A., Morford, L. A., & Hartsfield, J. K. (2016). Bone Density and Dental External Apical Root Resorption. *Current Osteoporosis Reports*, 292-309.
- Isaacson, K. G., Muir, J. D., & Reed, R. T. (2002). *Removable Orthodontic Appliances*. Elsevier.
- Iseri, H., & Solow, B. (1996). Continued eruption of maxillary incisors and first molars in girls from 9 to 25 years, studied by the implant method. *European Journal of Orthodontics*, 245-256.
- Joffe, L. (2003). Current Products and Practice Invisalign ®: early experiences. *Journal of Orthodontics*, 348-352.
- Jowsey, J. (1960). Age Changes in Human Bone. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 210-218.
- Ke, Y., Zhu, Y., & Zhu, M. (2019). A comparison of treatment effectiveness between clear aligner and fixed appliance therapies. *BMC Oral Health*, 1-10.
- Kohda, N., Iijima, M., Muguruma, T. B., Ahluwalia, K. S., & Mizoguchi, I. (2013). Effects of mechanical properties of thermoplastic materials on the initial force of thermoplastic appliances. *Angle Orthodontist*, 476-483.
- Kravitz, N. D., Kusnoto, B., BeGole, E., Obrez, A., & Agran, B. (2009). How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 27-35.
- Lee, R. T. (1999). Arch width and form: a review. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 305-313.
- Li, Y., Jacox, L. A., Little, S. H., & Ko, C. C. (2018). Orthodontic tooth movement: The biology and clinical implications. *Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 207-214.

- Lione, R., Franchi, L., Lagana, G., & Cozza, P. (2015). Effects of cervical headgear and pendulum appliance on vertical dimension in growing subjects: a retrospective controlled clinical trial. *European Journal of Orthodontics*, 338-344.
- Liu, L., Zhan, Q., Zhou, J., Kuang, Q., Yan, X., Zhang, X., Shan, Y., Li, X., Lai, W., & Long, H. (2021). Effectiveness of an anterior mini-screw in achieving incisor intrusion and palatal root torque for anterior retraction with clear aligners. *The Angle orthodontist*, 794-803.
- Lombardo, L., Arreghini, A., Ramina, F., Huanca Ghislanzoni, L. T., & Siciliani, G. (2017). Predictability of orthodontic movement with orthodontic aligners: a retrospective study. *Progress in Orthodontics* .
- Marcotte, M. R. (2003). *Biomechanics in Orthodontics*. Santos.
- Momtaz, P. (2016). The Effect of Attachment Placement and Location on Rotational Control of Conical Teeth Using Clear Aligner Therapy. *Journal of Aligner Orthodontics*, 29-36.
- Moyers, R. E., Van Der Linden. F. P. G. M., Riolo, M. L., & McNamara, J. A. (1976). Standards of Human Occlusal Development. *Center for Human Growth and Development*, 49-180.
- Nahoum, H. I. (2014). Forces and moments generated by removable thermoplastic aligners. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 545-546.
- Nanci, A., & Bosshardt, D. (2006). Structure of periodontal tissues in health and disease. *Periodontology 2000*, 11-28.
- Nanda, R., & Kuhlberg, A. (1997). *Biomechanics in Clinical Orthodontics*. Saunders, Philadelphia.
- Nielsen, L. E., & Dekker, M. (1975). Mechanical Properties of Polymers and Composites. *Em Polymer Letters Edition* (pp. 120-121).
- Papadopoulou, A. K., Cantele, A., Polychronis, G., Zinelis, S., & Eliades, T. (2019). Changes in roughness and mechanical properties of Invisalign® appliances after one- and two-weeks use. *Materials*.

- Phan, X., & Ling, P. H. (2007). Clinical limitations of invisalign. *Journal of the Canadian Dental Association*, 263-266.
- Proffit, W. R., Fields, H. W., & Sarver, D. M. (2019). *Contemporary orthodontics*. Elsevier Inc.
- Putrino, A., Barbato, E., & Galluccio, G. (2021). Clear aligners: Between evolution and efficiency—a scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1-16.
- Ravera, S., Castroflorio, T., Garino, F., Daher, S., Cugliari, G., & Deregibus, A. (2016). Maxillary molar distalization with aligners in adult patients: A multicenter retrospective study. *Progress in Orthodontics*.
- Rossini, G., Rossini, G., Castroflorio, T., Deregibus, A., & Debernardi, C. L. (2014). Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: A systematic review. *Angle Orthodontist*, 1-8.
- Rota, E., Parrini, S., Malekian, K., Cugliari, G., Mampieri, G., Deregibus, A., & Castroflorio, T. (2022). Lower Molar Distalization Using Clear Aligners: Bodily Movement or Uprighting? A Preliminary Study. *Applied Sciences*.
- Ryokawa, H., Miyazaki, Y., Fujishima, A., Miyazaki, T., & Maki, K. (2006). The mechanical properties of dental thermoplastic materials in a simulated intraoral environment. *Japanese Orthodontic Society*, 64-72.
- Saffar, J. L., Lasfargues, J. J., & Cherruau, M. (1997). Alveolar bone and the alveolar process: the socket that is never stable. *Periodontology 2000*, 76-90.
- Savignano, R., Valentino, R., Razionale, A. V., Michelotti, A., Barone, S., & D'Antò, V. (2019). Biomechanical Effects of Different Auxiliary-Aligner Designs for the Extrusion of an Upper Central Incisor: A Finite Element Analysis. *Journal of Healthcare Engineering*.
- Shellhart, W. C. (1995). Equilibrium clarified. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 394-401.
- Simon, M., Keilig, L., Schwarze, J., Jung, B. A., & Bourauel, C. (2014). Treatment outcome and efficacy of an aligner technique - regarding incisor torque, premolar derotation and molar distalization. *BMC Oral Health*, 1-7.

- Smith, R. J., & Burstone, C. J. (1984). Mechanics of tooth movement. *American Journal of Orthodontics*, 294-307.
- Steedle, J. R., & Proffit, W. R. (1985). The pattern and control of eruptive tooth movements. *American Journal of Orthodontics*, 56-66.
- Stein, G., & Weimann, J. (1925). Die Physiologische Wanderung der Zahne. 733-734.
- Sugawara, J., Daimaruya, T., Umemori, M., Nagasaka, H., Takahashi, I., Kawamura, H., & Mitani, H. (2004). Distal movement of mandibular molars in adult patients with the skeletal anchorage system. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 130-138.
- Takara, Y., Haga, S., Kimura, H., & Maki, K. (2022). Mechanical analysis of factors affecting clear aligner removability. *Dental materials journal*, 534-544.
- Tepedino, M., Paoloni, V., Cozza, P., & Chimenti, C. (2018). Movement of anterior teeth using clear aligners: a three-dimensional, retrospective evaluation. *Progress in Orthodontics*.
- Uda, Y., Azab, E., Sun, N., Shi, C., & Pajevic, P. D. (2017). Osteocyte Mechanobiology. *Current Osteoporosis Reports*, 318-325.
- Weinmann, J. (1954). Bone Formation and Bone Resorption. *Surgical Anatomy and Physiology*, 1074-1078.
- Weir, T. (2017). Clear aligners in orthodontic treatment. *Australian Dental Journal*, 58-62.
- Womack, W. R., Ahn, J. H., Ammari, Z., & Castillo, A. (2002). A new approach to correction of crowding. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 310-316.
- Zhang, X. J., He, L., Guo, H. M., Tian, J., Bai, Y. X., & Li, S. (2015). Integrated three-dimensional digital assessment of accuracy of anterior tooth movement using clear aligners. *Korean Journal of Orthodontics*, 275-281.