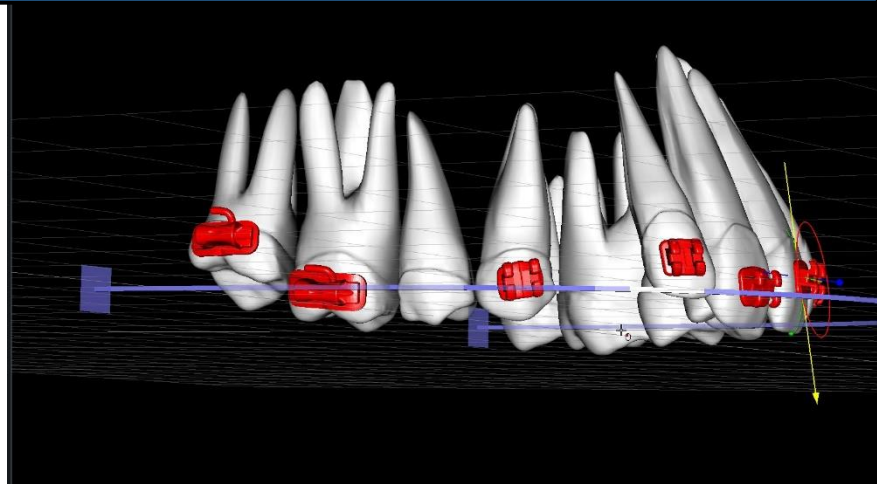


Conceitos básicos de Mecânica aplicados em Ortodontia



Dr. Jean-Marc Retrouvey

Dr. Katheine Koussaie

Translation; Dr. Wislei de Oliveira



IFDE
INTERNATIONAL
FOUNDATION FOR DENTAL EDUCATION

Conceitos básicos de Mecânica aplicados em Ortodontia

Dr. Jean-Marc Retrouvey
Dr. Katherine Kousaie
Translation: Dr Weislei Oliveira

1. CONTEÚDO

2	<u>Introdução</u>	
3	<u>Conceitos básicos de mecânica</u>	<u>2</u>
3.1	<u>Leis de Newton</u>	<u>3</u>
3.1.1	<u>Primeira Lei</u>	<u>3</u>
3.2	<u>Segunda Lei</u>	
3.3	<u>Terceira Lei</u>	<u>3</u>
4	<u>Conceito de força</u>	
4.1	<u>Força Única:</u>	<u>4</u>
4.1.1	<u>Definição:</u>	<u>4</u>
4.1.2	<u>Ponto de aplicação.</u>	<u>5</u>
4.1.3	<u>Linha de ação, direção e magnitude.</u>	<u>6</u>
4.1.4	<u>Lei da Transmissibilidade:</u>	<u>7</u>
4.1.5	<u>Ponto de aplicação da força:</u>	<u>7</u>
4.1.6	<u>Centro da Massa</u>	<u>7</u>
5	<u>Centro de Resistência (CR):</u>	<u>9</u>
5.1	<u>Variação da localização do centro de resistência em relação ao suporte periodontal</u>	<u>11</u>
5.1.1	<u>Centro de resistência de um único dente:</u>	<u>11</u>
5.1.2	<u>Centro de resistência de um grupo de dentes.</u>	<u>13</u>
5.1.3	<u>Forças concorrentes. Força resultante</u>	<u>14</u>
6	<u>Centro de Rotação:</u>	<u>16</u>
6.1.1	<u>Diagrama de Corpo Livre</u>	<u>16</u>
7	<u>Tipos de Movimentos Dentários</u>	<u>19</u>
7.1	<u>Translação</u>	<u>19</u>
7.2	<u>Rotação (pura)</u>	<u>20</u>
7.3	<u>Inclinação</u>	<u>21</u>
7.3.1	<u>Inclinação Descontrolada: quando uma força é aplicada na coroa, a coroa se move na mesma direção da força aplicada, enquanto a raiz se move na direção oposta. Nesse caso, o centro de rotação do movimento localiza-se próximo ao centro de resistência (Fig 30).</u>	<u>21</u>

7.3.2	<u>Inclinação Controlada:</u>	
	O centro de rotação localiza-se no ápice radicular. <u>Nesse tipo de movimento o momento gerado pela força será menor, e a inclinação ocorre ao redor do ápice (Fig 31).</u>	<u>21</u>
7.3.3	<u>Movimento Radicular</u>	<u>22</u>
7.3.4	<u>Intrusão/Extrusão</u>	<u>22</u>
8	<u>Sistema de Força</u>	
8.1	<u>Momento</u>	<u>24</u>
	<u>M = F x d</u>	<u>24</u>
8.2	<u>Binário</u>	<u>25</u>
8.3	<u>Relação Momento/Força</u>	<u>26</u>
8.4	<u>Movimentos quando forças e sistemas são variados</u>	<u>29</u>
8.5	<u>Sistema de força equivalente</u>	<u>34</u>
9	<u>Ancoragem</u>	<u>36</u>
9.1	<u>Aplicações</u>	<u>38</u>
9.1.1	<u>Retração de Canino</u>	<u>38</u>
9.1.2	<u>Extrusão para aumento da coroa clínica e instalação de implantes</u>	<u>38</u>
10	<u>Leitura Recomendada</u>	<u>39</u>

2. INTRODUÇÃO

A Ortodontia é fundamentada em princípios básicos da física, no que diz respeito ao movimento de corpos no espaço. Naturalmente, os movimentos ortodônticos são mais complexo, pois os corpos a serem movidos localizam-se na cavidade oral, e estão sujeitos a um sistema de força bem mais complexo que pode ser determinado por uma simples análise mecânica. A Biomecânica é uma parte importante da Ortodontia em razão do estudo do equilíbrio estático, e o efeito das forças no sistema biológico. Este livro busca simplificar a biomecânica ortodôntica e prover um guia para as suas aplicações clínicas.

3. MECÂNICAS BÁSICAS

Há alguns conceitos básicos de física que é interessante revê-los antes de iniciar a aplicação da biomecânica ortodôntica nos casos clínicos.

Na Ortodontia utilizamos as Leis de Newton para explicar os efeitos das forças sobre os dentes.

1. AS TRÊS LEIS DE NEWTON

As Leis de Newton descrevem o movimento de um corpo quando submetidos à uma força. A Primeira e Terceira Lei de Newton são as mais importantes para a ortodontia.

1. Primeira Lei

Na ausência de atrito, um corpo permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme a menos que uma força externa atue sobre ele. A Primeira Lei de Newton essencialmente descreve o conceito da inércia, ou a reação do corpo (resistência) ao movimento quando solicitado por uma força. (Fig 1).

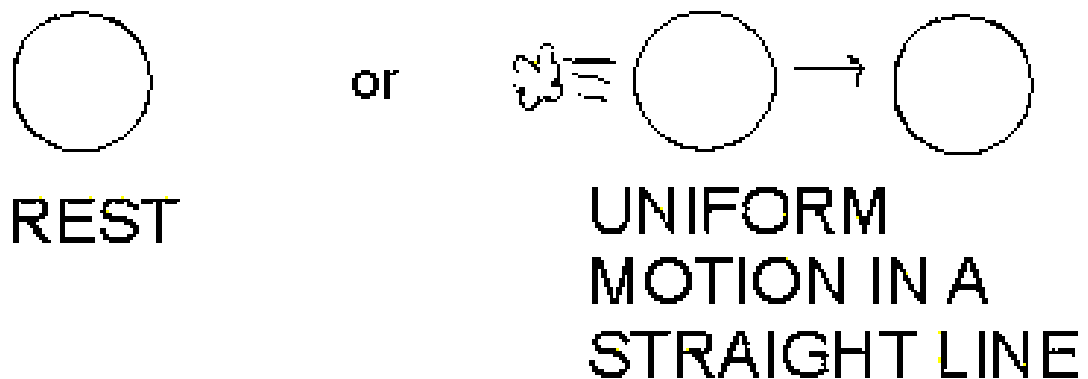


Figura 1 : Primeira Lei de Newton

2. SEGUNDA LEI

A aceleração de um corpo ocorre na mesma direção da força aplicada, e depende da magnitude da força e da massa do corpo.

$$F_{\text{net}} = m \cdot a$$

(Força = massa x aceleração)

3. TERCEIRA LEI

De acordo com a Terceira Lei de Newton para cada força de ação haverá uma força de reação de igual magnitude e sentido contrário. Desta forma, sempre que houver uma interação entre dois corpos ocorrerão forças de ação e reação entre eles. Portanto, sempre haverá um par de forças. Esse par de forças (ação e reação) são vetores que possuem magnitude e direção. A magnitude da força no primeiro corpo será sempre igual à magnitude da força sobre o segundo corpo, e os sentidos serão opostos.

Considere o contato entre a roda de um automóvel e a estrada. A roda ao girar exerce uma força sobre a estrada. Ao mesmo tempo, a estrada exerce uma força sobre a roda de igual magnitude e sentido contrário. De certo modo, as rodas empurram a estrada para trás e a estrada empurra as rodas para frente (forças iguais e opostas), fazendo com que o automóvel se mova para frente.

Na cavidade oral, podemos observar exemplos de sistemas de ação e reação. A mola exerce uma força sobre o gancho do canino, e o gancho exerce uma força de igual magnitude e sentido contrário sobre a mola. Assim teremos um par de forças de mesma magnitude e sentidos contrários agindo em dois corpos diferentes (Fig 2).

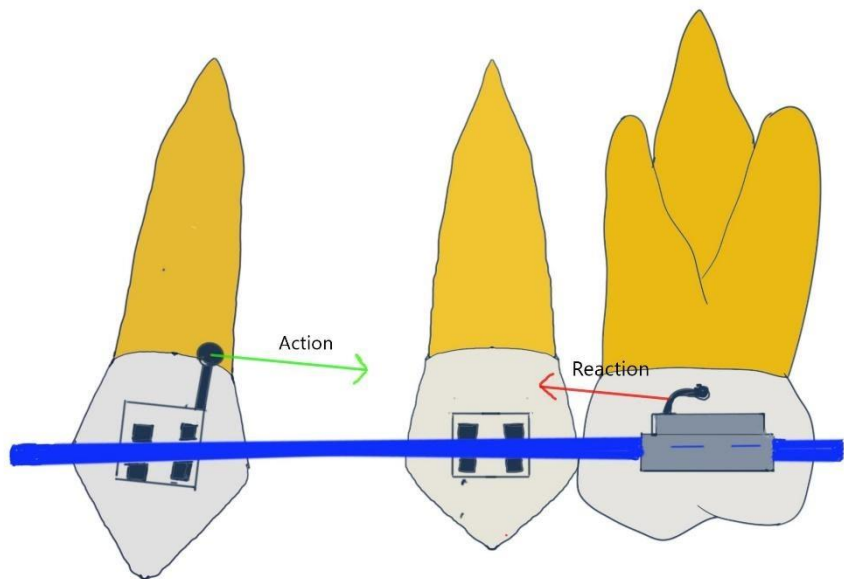


Figura 1: Action and reaction forces place the system in equilibrium. This is a simplified drawing.

4. CONCEITO DE FORÇA

1. FORÇA ÚNICA:

1. Definição:

Uma força é qualquer ação que resulta na alteração do movimento de um corpo. As forças podem ser medidas em ounces, gramas, ou Newton (aproximadamente 100gr por 1 Newton no planeta Terra, uma vez que a aceleração da gravidade é considerada constante e igual a $9.807/s^2$). Em Ortodontia, a unidade de força utilizada normalmente é gramas (2).

Direção e magnitude de uma força

A força por ser uma grandeza vetorial na sua descrição deve constar a direção e magnitude.

A magnitude é representada pelo comprimento da seta referente à uma escala (fig 3).

2. Ponto de aplicação.

O ponto de aplicação da força é a localização onde a força é aplicada sobre o corpo, e por convenção será a origem da seta. A localização do ponto de aplicação da força

está relacionada ao centro da massa, e a sua localização precisa determinará a tendência do objeto de transladar e rotacionar quando submetido a esta força.

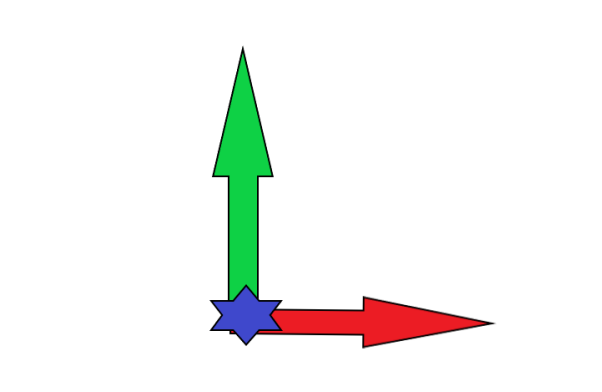


Figura 3: Ponto de aplicação das forças

Na figura 4, os vetores verde e vermelho estão em direções diferentes, mas compartilham o mesmo ponto de aplicação.

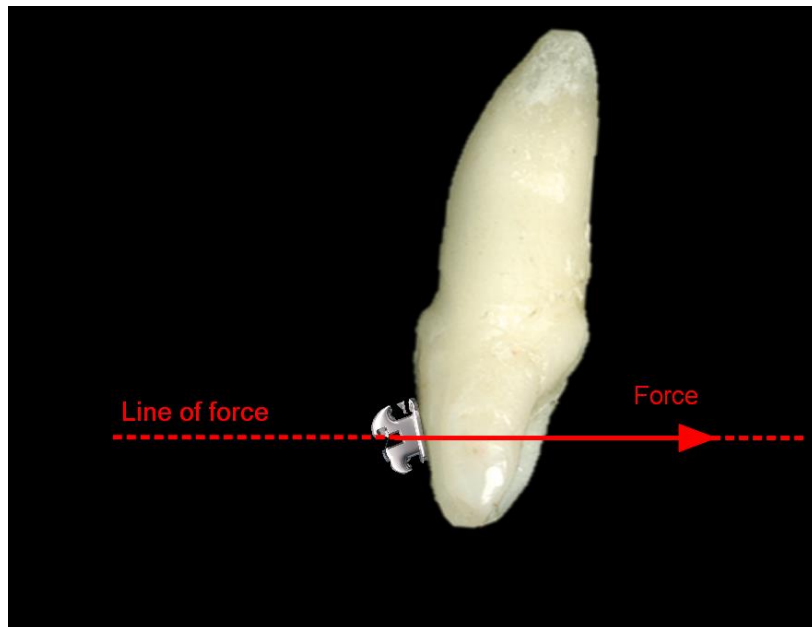


Figura 4: Uma força única aplicada ao braquete de um incisivo central. A linha de ação ilustra a direção do vetor de força.

3. Linha de ação com direção e magnitude.

A linha de ação é a representação geométrica da trajetória da força aplicada (Wikipedia). A linha de ação é o eixo de deslocamento quando a força é aplicada. O sentido da força é determinado pela orientação da seta. A magnitude é o comprimento da seta por convenção.

Duas forças de igual magnitude que compartilham a mesma linha de ação provocam o mesmo efeito sobre o corpo. Na figura 6, F_1 e F_2 produzirão o mesmo efeito sobre o corpo azul abaixo. Não importa se a força puxa ou empurra o objeto, o seu efeito final será idêntico.

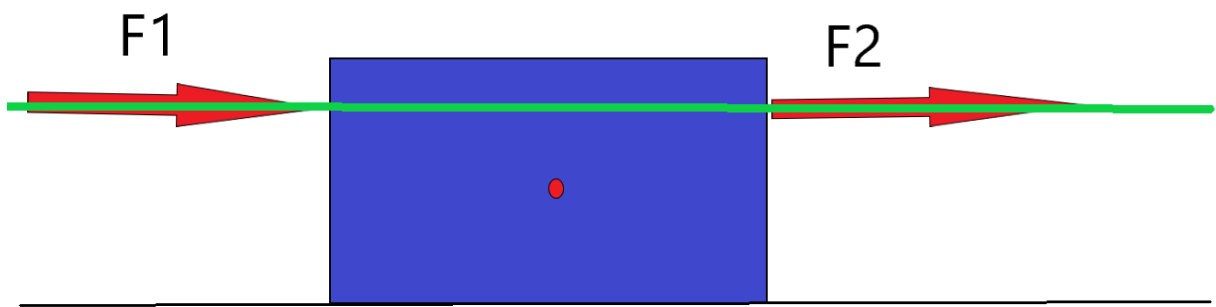


Figura 5: Linha de ação da força

4. Lei da Transmissibilidade:

O efeito de uma força em um corpo será o mesmo quando aplicado em qualquer ponto ao longo da sua linha de ação (Fig 7). Por exemplo, dentro da linha de ação a força poderá ser aplicada na borda incisal, no bráquete, ou no cingulo, desde que a força apresente a mesma direção e magnitude o seu efeito permanece o mesmo.

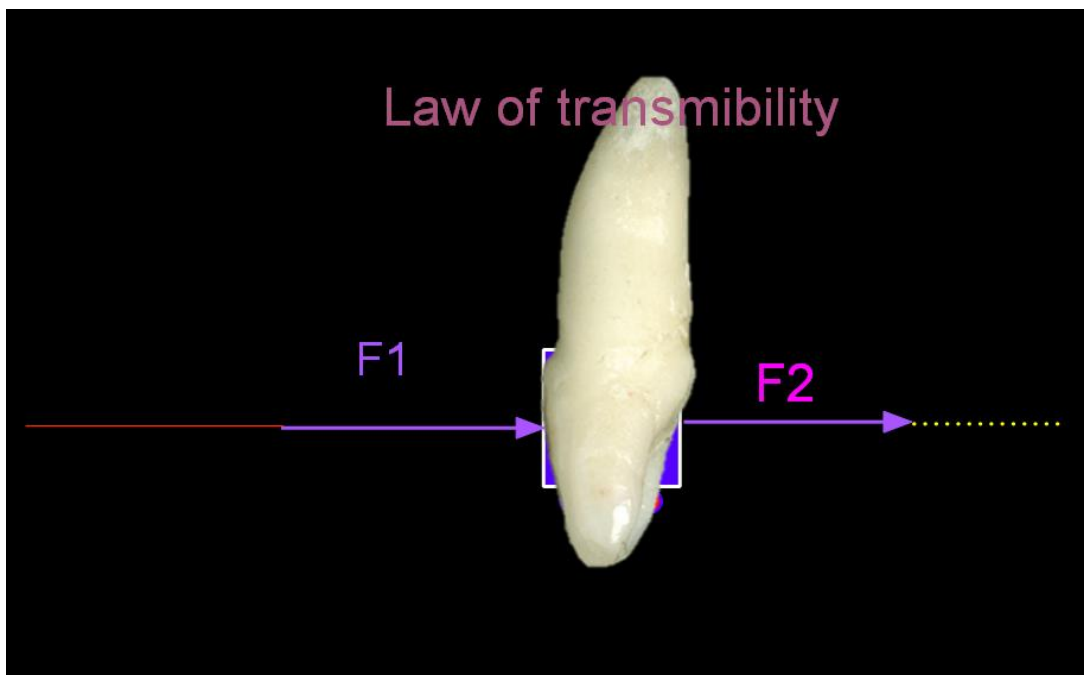


Figura 7: Lei da transmissibilidade :: F1 e F2 produzirão o mesmo efeito

5. Ponto de aplicação da força:

A lei da transmissibilidade diz que forças de mesma magnitude e direção produzem o mesmo efeito desde que compartilhem a mesma linha de ação.

Grandezas escalares: não são utilizadas para descrever forças; grandezas escalares possuem magnitude, mas não direção.

Grandezas Vetoriais: possuem magnitude e direção (vetores são utilizados nos diagramas de corpo livre).

Corpo Rígido: a sua forma não é alterada quando submetida à ação de uma força (por exemplo, forças de tensão e tração). Os dentes são considerados corpos rígidos; já os tecidos moles não!

6. Centro da Massa

O centro da massa representa o centro de gravidade de um corpo. Em um corpo qualquer, por exemplo, o dente, o centro da massa é um ponto onde se concentra toda a sua massa. Se não houver forças agindo sobre o corpo, toda a sua massa estará concentrada em um único ponto (centro da massa).

Figura 8: Linha de ação da força posicionada no centro da massa

Se uma força for aplicada no centro da massa o corpo se moverá na direção da força por translação (translação pura).

O mesmo ocorre com uma caixa ou qualquer outro objeto na superfície da Lua (ou em qualquer ambiente onde não haja forças agindo sobre o dente) (Fig 9). Obviamente essa não é uma situação realística, mas um conceito teórico!

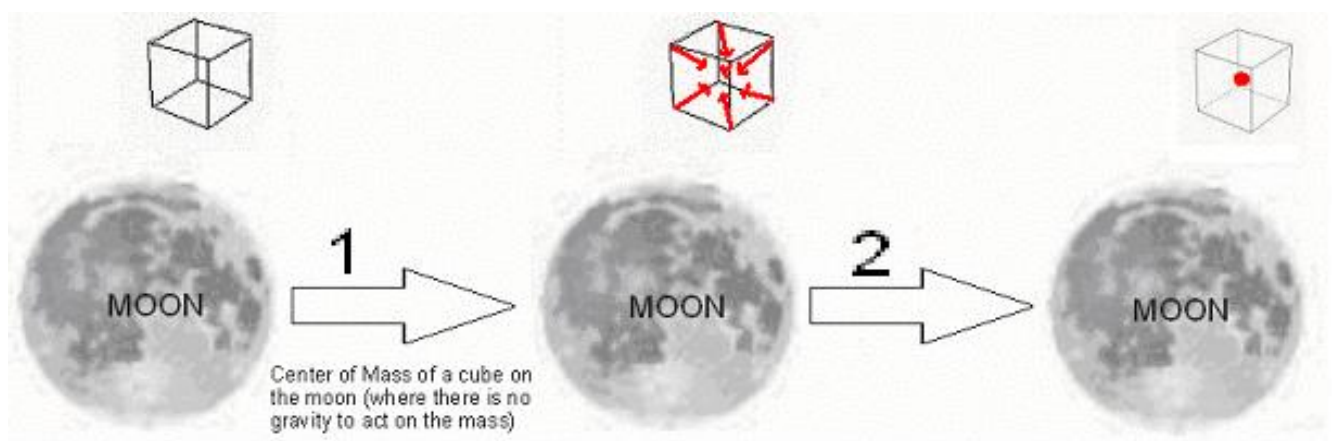


Figura 9: Centro da massa da Lua

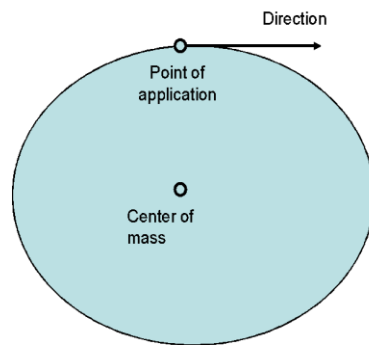


Figura 10: linha de ação da força posicionada distante do centro da massa

Se a linha de ação da força passar a uma determinada distância do centro de resistência, observa-se um movimento combinado de rotação e translação (figura 10).

5. CENTRO DE RESISTÊNCIA (CR):

O centro de resistência é um importante conceito na ortodontia. Os dentes não são considerados [corpos livres](#), pois suas raízes estão inseridas no osso alveolar e presas ao ligamento periodontal. O centro da massa e o centro de resistência não estão localizados no mesmo ponto. O CR está localizado mais apicalmente em relação ao centro da massa. O CR é um ponto matemático no qual toda a resistência ao deslocamento se concentra. Cálculos do sistema de força em relação ao seu potencial de translação e rotação são realizados em relação ao centro de resistência.

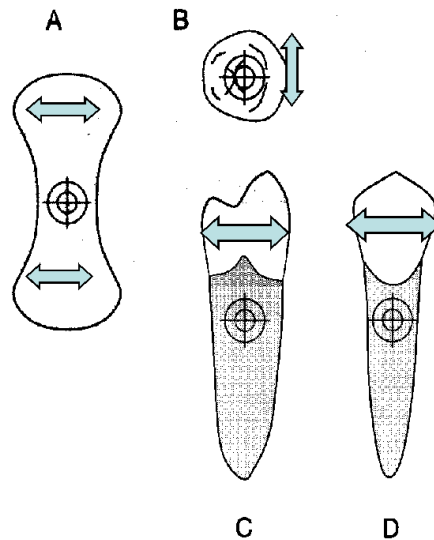


Figure 1-1. The center of resistance. *A*, The center of mass of a free body. *B*, *C*, and *D*, The center of resistance of a single tooth. *B* is the frontal view, *C* is the occlusal view, and *D* is the mesial view.

Figura 11: Localização do centro de resistência em diferentes perspectivas: A. Radicular, B: Oclusal. C: Labio-lingual, D.: Mesio-Distal

O centro de resistência pode variar de acordo com o nível do suporte periodontal. Em condições normais, o CR localiza-se próximo ao meio do comprimento radicular. (Fig 11)

O centro de resistência considera todas as forças que agem sobre o dente. Isso inclui forças provenientes do ligamento periodontal (LP), vasos sanguíneos, osso, e tecidos conectivos (Fig 12). O centro de resistência pode ser considerado para um único dente, ou um grupo de dentes unidos rigidamente (quando unidos se comportam como um corpo de larga massa).

Importância do centro de resistência: quando forças são aplicadas sobre o dente, é importante avaliar os seus efeitos nos três planos do espaço, e o movimento resultante que poderá ocorrer como resultado da ação das forças.

VARIAÇÃO DO CENTRO DE RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO AO SUPORTE PERIODONTAL

Alveolar bone support

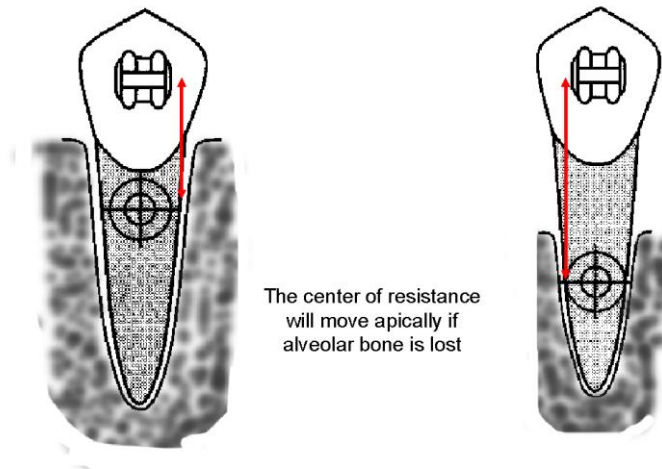
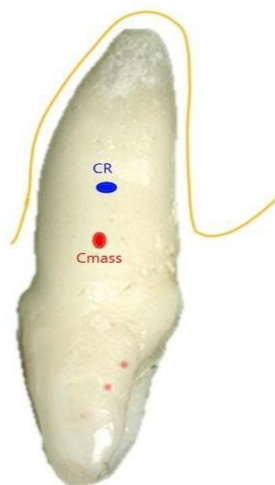


Figura 12: O Centro de Resistência se desloca em direção apical quando há perda óssea horizontal .

Quando um paciente apresenta uma redução do suporte periodontal, a crista óssea alveolar se move em direção apical . O centro de resistência do dente se desloca também em direção apical, e a distância do bráquete ao centro de resistência aumenta quase o dobro (figura 12). Se a mesma força for aplicada ao nível do bráquete nesses dois dentes resultará em dois tipos distintos de movimento . O dente à direita sofrerá uma rotação maior de acordo com a distância da linha de ação da força ao centro de resistência do dente.

1. Centro de resistência de um único dente:



O centro da massa estará sempre mais para a oclusal que o centro de resistência devido à “resistência” do ligamento periodontal e osso alveolar. Determinar com exatidão o centro de resistência de cada dente e em cada paciente é quase impossível, pois é um conceito teórico, mas pode ser utilizado como uma média para criar sistemas de forças otimizados.

Figura 13: Centro de resistência (CR) vs Centro da massa (Cmass) de um dente monorradicular

Nos casos onde há homogeneidade do suporte periodontal de um grupo de dentes, o centro de resistência será em níveis diferentes. O canino superior terá o centro de resistência mais alto, enquanto os pré-molares e incisivos laterais serão os mais baixos.

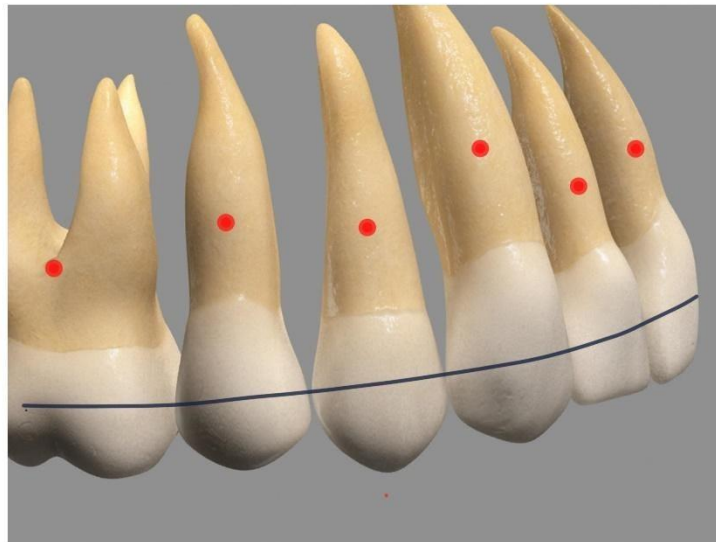


Figura 14: Diferentes centros de resistência (se considerar o suporte periodontal homogêneo e normal)

Portanto, o centro de resistência varia entre dentes com comprimentos radiculares diferentes e anatomia, por exemplo, entre incisivos e molares, ou pré-molares e caninos. Sua posição também varia com a altura do osso alveolar, de maneira que será diferente entre uma criança e um adulto com doença periodontal (o centro de resistência se move mais para apical em adultos com perda óssea alveolar) (Fig 14).

Uma outra definição de centro de resistência seria o ponto do dente onde ao aplicar uma força única resultará em [translação](#) (Fig 15).

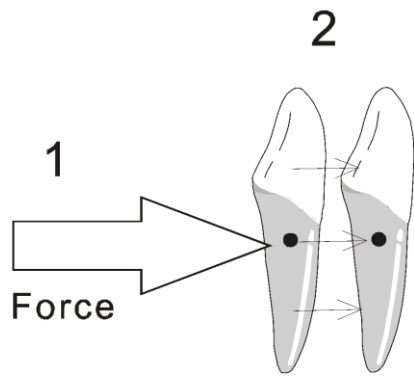


Figura 15: Força aplicada no centro de resistência resulta em translação pura

2. Centro de resistência de um grupo de dentes .

Quando dois ou mais dentes estiverem unidos rigidamente são considerados um corpo único, e com um novo centro de resistência.

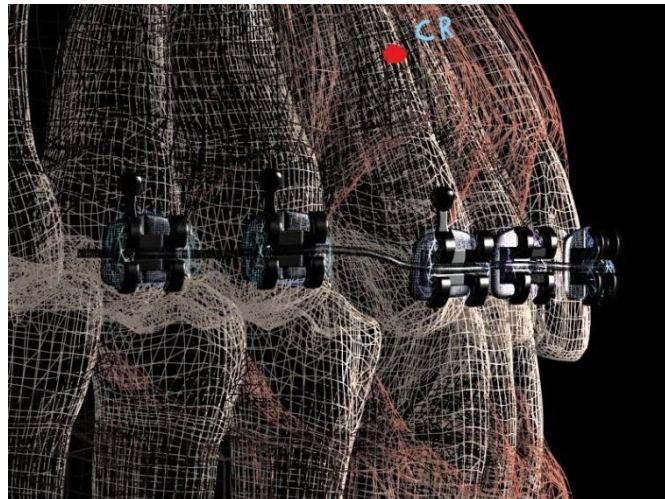


Figura 16: Centro de resistência de um grupo de dentes

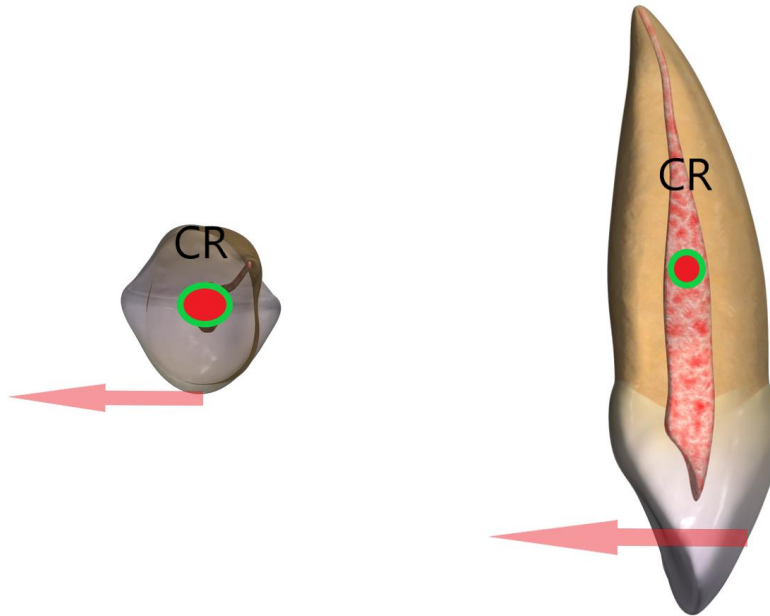


Figura 17: Quando uma força perpendicular ao longo eixo do dente é aplicada no bráquete a sua linha de ação passa a uma determinada distância do centro de resistência

5.1.3 Forças concorrentes, força resultante e decomposição de forças

Em ortodontia, a combinação de forças nos três planos do espaço é frequentemente utilizada, e calcular a força resultante pode ser muito útil. O método do paralelogramo ou polígono fechado são métodos geográficos utilizados para calcular a soma vetorial.

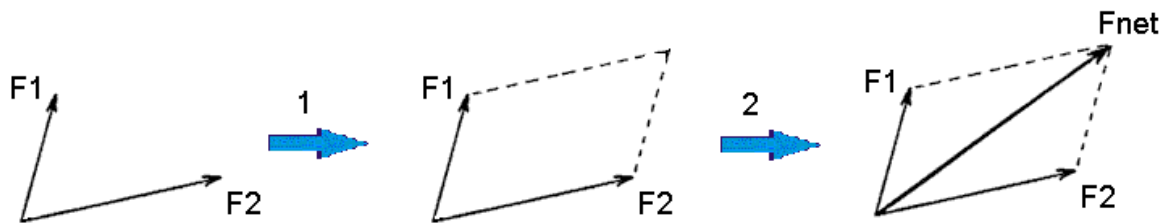


Figura 18. Método do paralelogramo

É importante lembrar que a força resultante (F_{net}) representa a soma de todos os vetores (F_1 e F_2). O método do paralelogramo pode ser utilizado para determinar a força resultante: as forças F_1 e F_2 são vetores, portanto possuem magnitude e direção. Quando F_1 e F_2 são concorrentes podemos desenhar um paralelogramo desenhando F_1 e F_2 nos lados adjacentes. A linha diagonal corresponde à força resultante F_{net} (Fig 18).

Cálculos da soma de 2 vetores (Por favor click no link abaixo para maiores informações: <https://www.mathstopia.net/vectors/parallelogram-law-vector-addition>)

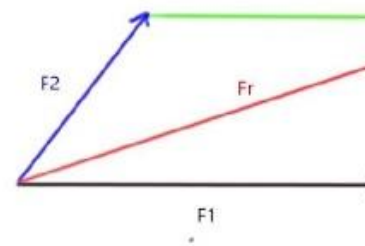


Figura 19: Cálculo da soma de dois vetores concorrentes.

Para calcular a magnitude da força resultante F_r utilizamos fórmulas trigonométricas $F_r = F_1 + F_2$.

É necessário estender a linha de ação de F_1 para criar um triângulo OXR e adicionar os ângulos α e β .

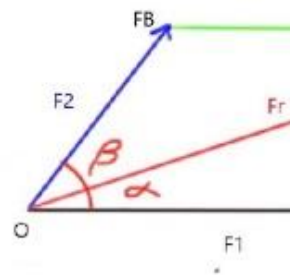


Figura 20: Método do paralelogramo.

Cálculo da magnitude da Fr:

$$Fr^2 = OX^2 + RX^2$$

$$OX = OF_a + F_aX \text{ or}$$

$$Fr^2 = (OF_a + F_aX)^2 + RX^2$$

Sabemos que $\cos \beta = \frac{\text{cateto adjacente}}{\text{hipotenusa}} = \frac{\text{ângulo } \beta}{\text{hipotenusa}}$

F_{ax}/F_2 ou $F_{ax} = F_2 \cos \beta$ e $\sin \beta = \frac{R_x}{F_2}$ ou $R_x = F_2 \sin \beta$

$F_r = F_2 \sin \beta +$

Substituindo os valores: $F_r = F_1^2 + 2F_1F_2 \cos \beta + F_2^2$

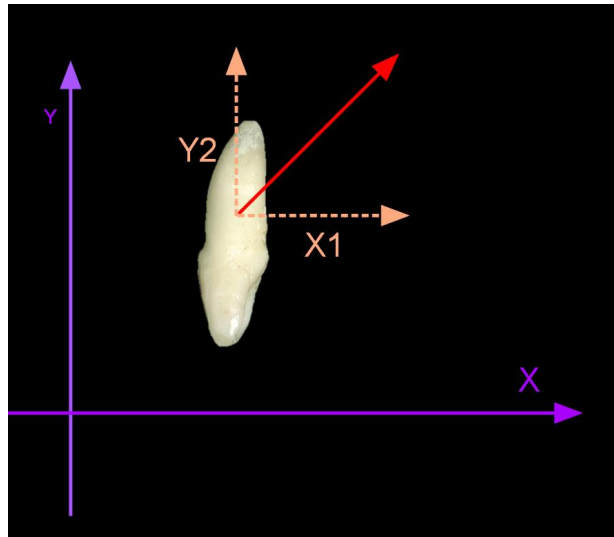


Figura 21: Força resultante quando as forças são ortogonais

Quando as forças formam um ângulo de 90 graus a equação é simplificada:

$$F_r = X_1^2 + F_{Y2}^2$$

6. CENTRO DE ROTAÇÃO:

O Centro de Rotação é o ponto sobre o qual o dente rotaciona, e a sua localização pode variar de acordo com a localização do centro de resistência e a força aplicada. A rotação pura ocorre quando o centro de rotação coincide com o centro de resistência. A [translação](#) pura ocorre quando o centro de rotação encontra-se no infinito.

Para determinar o centro de rotação do movimento dentário (Fig 22) selecionamos dois pontos quaisquer na posição inicial e final do dente, e a seguir ligamos os pontos e traçamos uma bissetriz. O ponto de intersecção entre as linhas perpendiculares indica o centro de rotação.

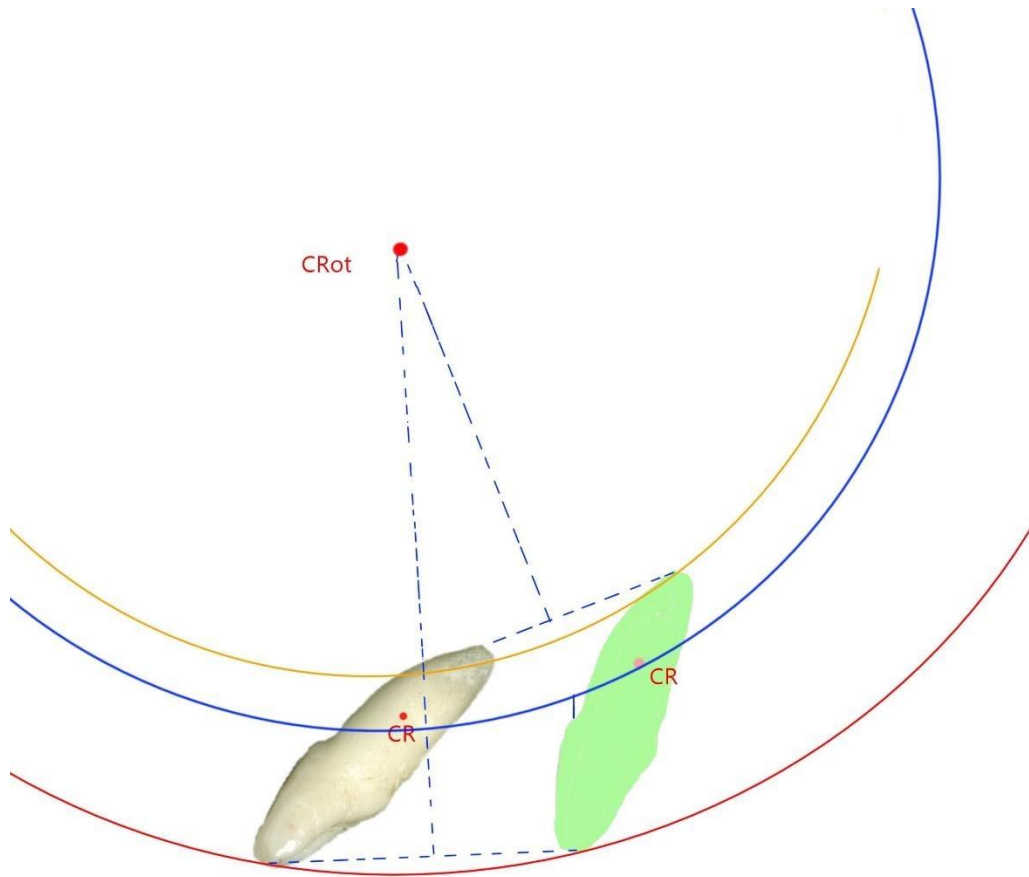


Figura 22: Método de localização do centro de rotação

1. Diagram de Corpo Livre

Diagrama de Corpo Livre é utilizado para prever os efeitos de diferentes forças que agem sobre o dente (força resultante ou as forças decompostas).

Um exemplo de diagrama de corpo livre com F_1 , F_2 , F_{net} (veja [método do paralelogramo](#)) (Fig 23).

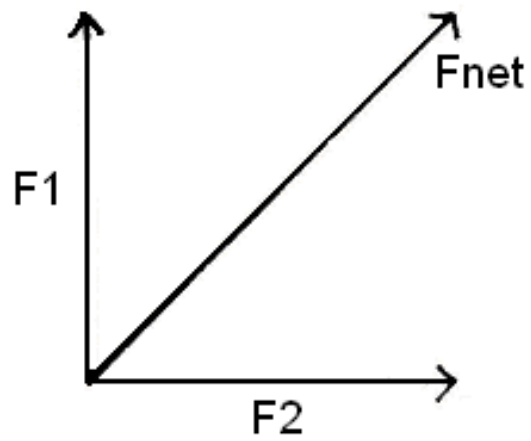


Figura 23: Diagrama de Corpo Livre

Um exemplo clínico do uso do Diagrama de Corpo Livre é a ilustração das forças do arco de intrusão e elástico

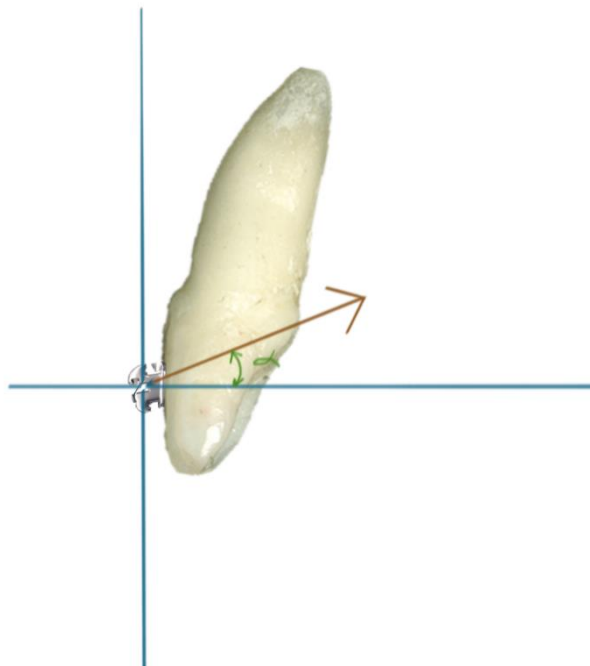


Figure 24: Força única para intruir e retrair o incisivo superior.

A force F é aplicada, a qual possui uma componente intrusiva e retrusiva. Se conhecemos a magnitude e ângulo da força aplicada podemos determinar a magnitude das componentes intrusiva e retrusiva utilizando cálculos trigonométricos (Fig 24-25)

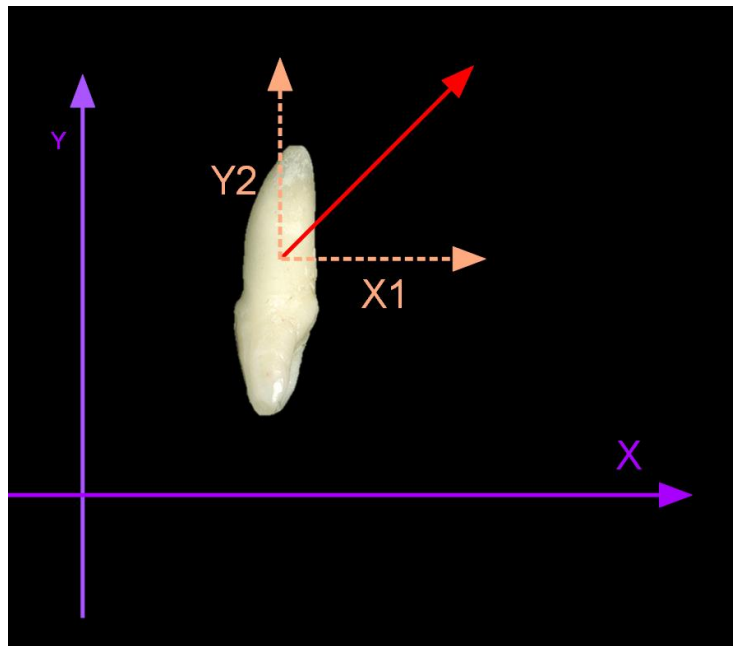
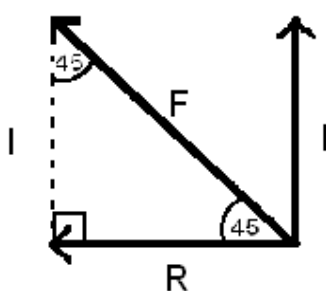


Figura 25: Free body diagram and the forces applied from a headgear

Considerando a $F_{net} = 500g$, podemos calcular a força intrusiva e retrusiva utilizando o as regras do triângulo retângulo (Fig 26).



$$\sin 45 = \frac{I}{F}$$

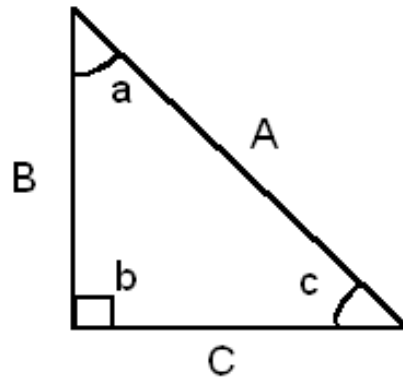
$$\begin{aligned} I &= F \sin 45 \\ &= 500 \sin 45 \\ &= 353 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\cos 45 = \frac{R}{F}$$

$$\begin{aligned} R &= F \cos 45 \\ &= 500 \cos 45 \\ &= 353 \text{ g} \end{aligned}$$

Figura 26: Decomposição vetorial utilizando a regra do triângulo retângulo

Assim, uma força de 500g na direção de F_{net} equivale a 353g de força na direção I , e 353g na direção de R aplicada no mesmo corpo ao mesmo tempo.



$$\sin a = \frac{\text{opposite}}{\text{hypoteneuse}} = \frac{B}{A}$$

$$\cos a = \frac{\text{adjacent}}{\text{hypoteneuse}} = \frac{C}{A}$$

$$\tan a = \frac{\text{opposite}}{\text{adjacent}} = \frac{B}{C}$$

Figura 26: Cálculos Trigonométricos

7. TIPOS DE MOVIMENTOS DENTÁRIOS

O movimento dentário poderá ocorrer nos três planos do espaço. Portanto é importante conhecer os diferentes tipos de movimento dentário possíveis quando planejamos o tratamento, considerando os movimentos desejáveis e indesejáveis.

1. TRANSLAÇÃO

Durante a translação, todos os pontos do corpo se movem na mesma direção e paralelamente (Fig 28). O centro de rotação desse tipo de movimento encontra-se no infinito, pois não haverá nenhum tipo de rotação.

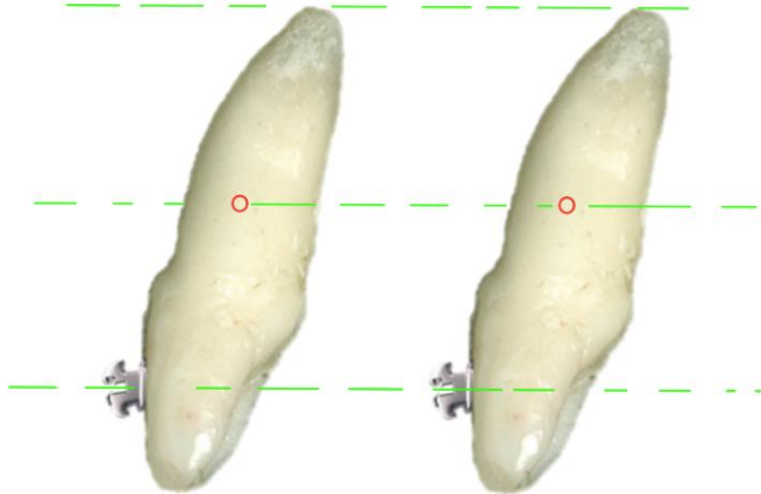


Figura 28: Translação do incisivo central

2. ROTAÇÃO (PURA)

A rotação pura ocorre quando um corpo rotaciona ao redor do [centro de resistência](#) (Cres) (i.e. quando o centro de rotação coincide com o centro de resistência (Fig 29).





Figura 29: Rotação Pura

3. INCLINAÇÃO

O grau de inclinação depende do local de aplicação da força.

1. **Inclinação descontrolada:** quando uma força perpendicular ao longo eixo do dente é aplicada ao nível do bráquete a coroa se move na direção da força aplicada , enquanto o ápice radicular se move em direção oposta. Nesse caso, o centro de rotação encontra-se próximo ao centro de resistência , (Fig 30).

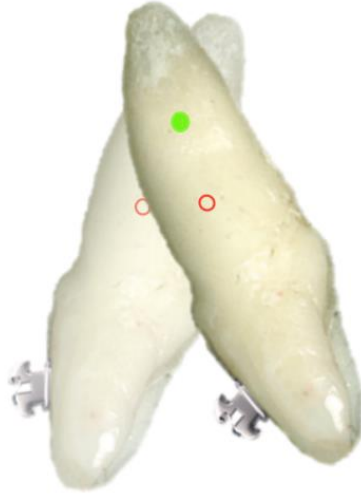


Figura 30: Inclinação descontrolada

2. Inclinação Controlada:

O centro de rotação localiza-se no ápice radicular. Esse movimento requer um momento e uma força, e o dente rotaciona ao redor do Crot (Fig 31).

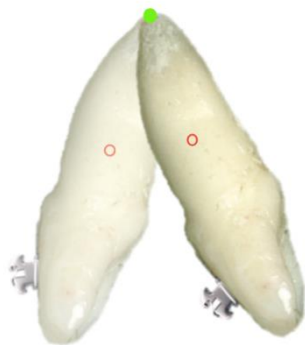


Figura 31: Inclinação controlada

A. Por exemplo, na correção da Classe II com vestibularização dos incisivos maxilares o uso de inclinação descontrolada poderia resultar em perfuração da cortical vestibular, ao passo que a inclinação controlada resultará no movimento somente de coroa, assim não haverá perfuração da cortical vestibular.

3. Movimento radicular

O movimento radicular ocorre quando o centro de rotação localiza-se próximo ou na borda incisal, e a rotação ocorre ao redor desse ponto (Fig 32). Portanto, a coroa se desloca menos que a raiz. Os movimentos radiculares levam mais tempo para se manifestar devido ao tempo necessário para que ocorra a reabsorção óssea.

Figura 32: Movimento radicular

4. Extrusão/Intrusão

Extrusão e intrusão envolve movimentos ao longo do longo eixo do dente (Fig 33, Fig 34). Veja [translação \(fig. 28\)](#), o centro de rotação está no infinito nesse tipo de movimento (pois não há rotação). Em outras palavras, o dente não sofre rotação alguma, apenas translação ou intrusão/extrusão.

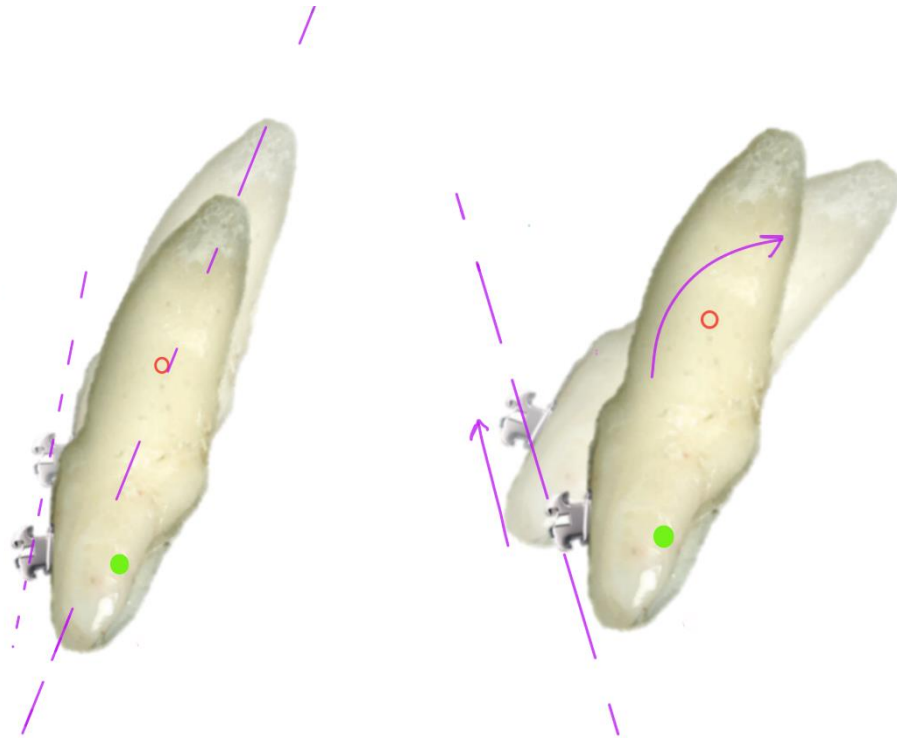
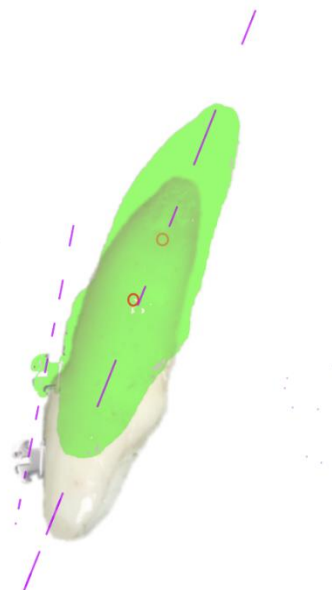


Figura 7: A. Intrusão e extrusão do incisivo . B. Intrusão relativa

Intrusão: Na fig 33A, (no exemplo seguinte, os efeitos indesejáveis da intrusão não são considerados: enquanto um dente é intruído os dentes adjacentes são extruídos, a menos que estejam ancorados. (Veja ancoragem). A intrusão relativa é o resultado de intrusão com vestibularização (fig 33B)

Extrusão: (no exemplo seguinte (Fig 34), os efeitos indesejáveis da extrusão não são considerados: enquanto um dente é extruído os dentes adjacentes são levemente intruídos, ao menos que estejam ancorados . (Veja ancoragem)



8. SISTEMA DE FORÇA

Para compreender como planejar o movimento dentário desejado devemos considerar o sistema de força. O sistema de força é composto de uma força e um momento, e a sua relação determina o tipo de movimento produzido. Esta seção abordará momento, binário, relação momento/força, e os movimentos produzidos com suas variações.

1. MOMENTO

Momento é a tendência de uma força em causar rotação. Para calcular o momento de uma força multiplicamos a magnitude da força pela distância perpendicular ao [centro de resistência](#) (Fig 35).

$$M = F \times d$$

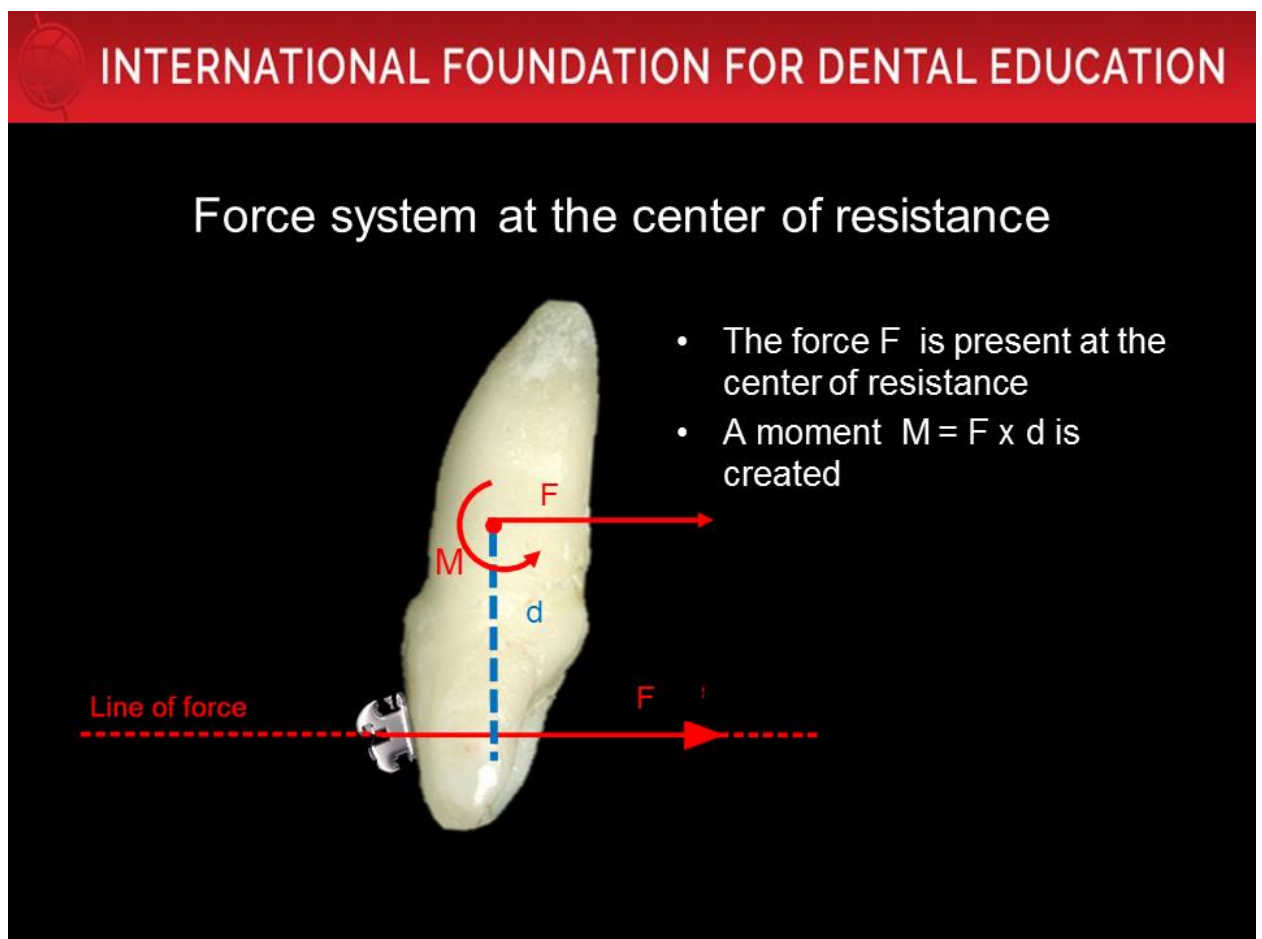


Figura 35: Momento produzido pela força aplicada pela distância ao centro de resistência

2. BINÁRIO

Um binário ocorre quando duas forças (F_1 , F_2) possuem igual magnitude e sentidos opostos e não são colineares. Para calcular o momento de uma força, considere as forças separadamente.

Exemplo: F_1 e F_2 não produzem translação porque são iguais e sentidos opostos. Ambos os momentos produzidos pelas duas forças possuem o mesmo sentido (imagine a rotação ao redor do centro de resistência quando as forças são aplicadas em F_1 e F_2). . Considere o seguinte exemplo de um binário (Fig 36)

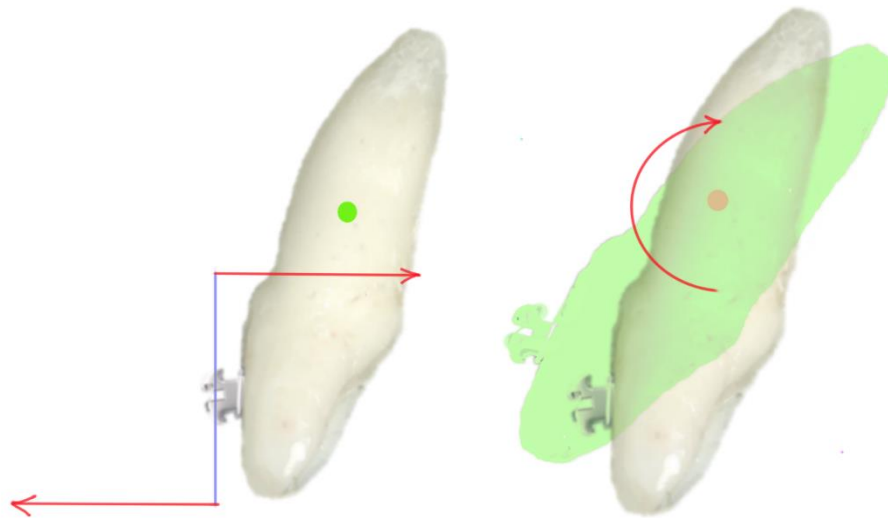


Figura 36: Binário: exemplo 1

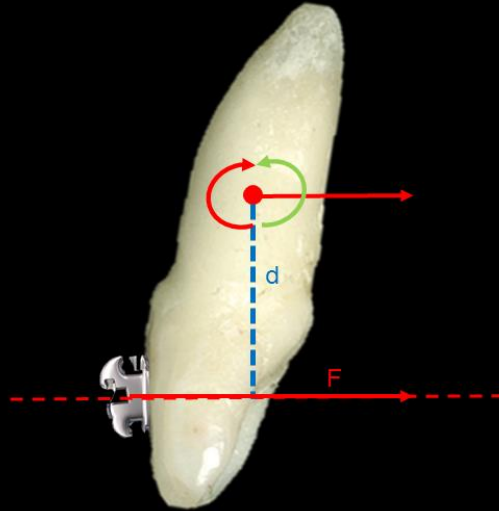
O binário não depende do ponto de aplicação, pois são considerados vetores livres. (the new locations in the following example are more biologically and clinically sound). **Concluindo, não importa se o binário age sobre o dente, o momento final no sistema será igual à força multiplicada pela distância entre as forças.**

3. RELAÇÃO MOMENTO FORÇA

A relação momento força combina o movimento de translação e rotação . A relação entre eles determina a amplitude da força multiplicada pela distância perpendicular ao centro de resistência de um dente ou grupo de dentes (Fig 37).

Os seguintes exemplos mostram uma inclinação controlada de um dente combinando movimentos de translação e rotação (Fig 38, Fig 39).

Moment to force ratio



As the distance from the point of application of the force is usually around 10 mm to the center of resistance for an incisor, the moment equal
 $M_f = 10 \times F$
 or
 Moment to force ratio = $M:F = 10$.

If a force of 100 grs is applied to the bracket, a counter moment of 1000 grmm is necessary to cancel the moment created by the simple force and obtain translation.

Figura 37: Relação momento/força para translação

Controlled Tipping:

If we want the following movement:

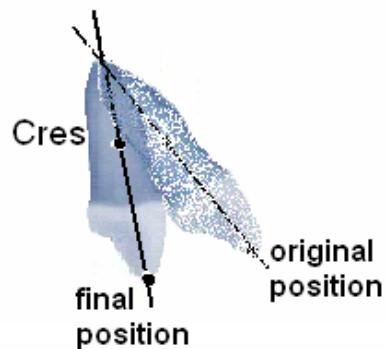
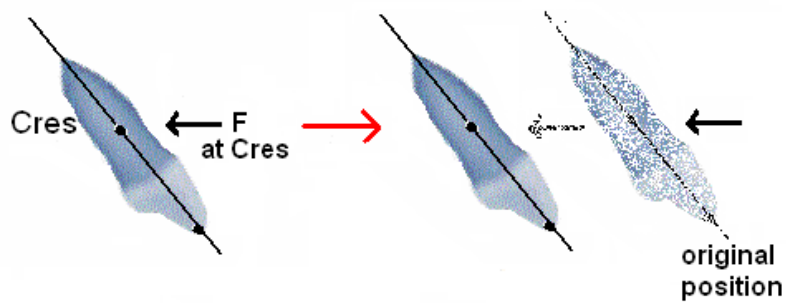


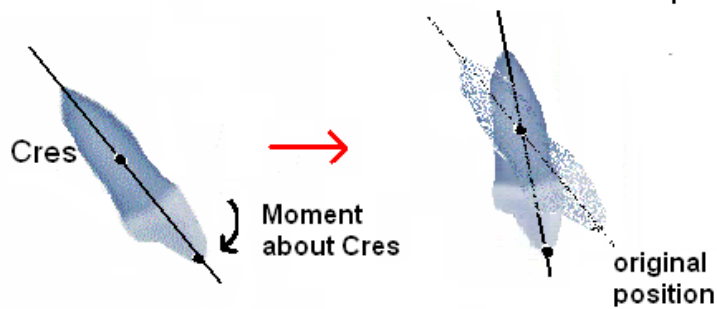
Figura 38: Movimento desejado

Break up the movement into its translation and rotation component parts

Translation:



Rotation:



Result:

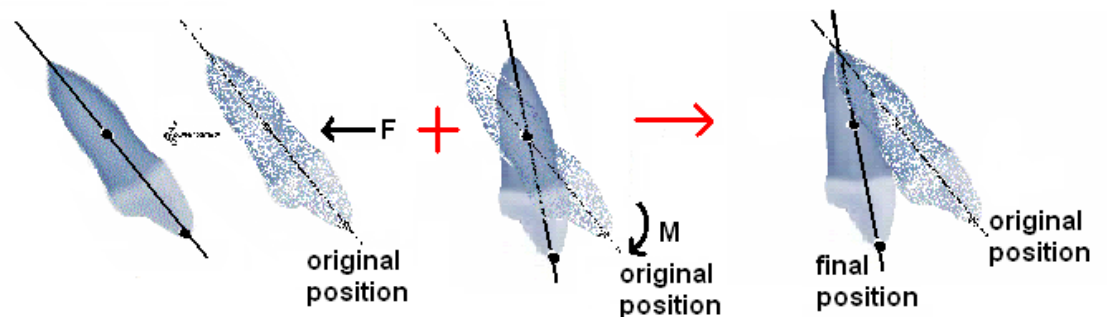


Figura 39: Combinação de translação e rotação para obter um movimento de inclinação controlada

Ao modificar a relação M/F podemos produzir diferentes centros de rotação. A Figura 40 mostra os efeitos da alteração da relação M/F na inclinação controlada. Se a relação M/F for reduzida (M é mantido e F aumentada), então teremos mais translação do que rotação, pois o centro de rotação migra para o ápice do dente (ou seja, estará mais distante do [Centro de Resistência](#)). Se a relação M/F for aumentada com o aumento do Momento ou redução da força, haverá maior rotação, uma vez que o centro de rotação se move em direção ao centro de resistência (ou seja, se move mais para a incisal em relação à posição anterior)

Consider:

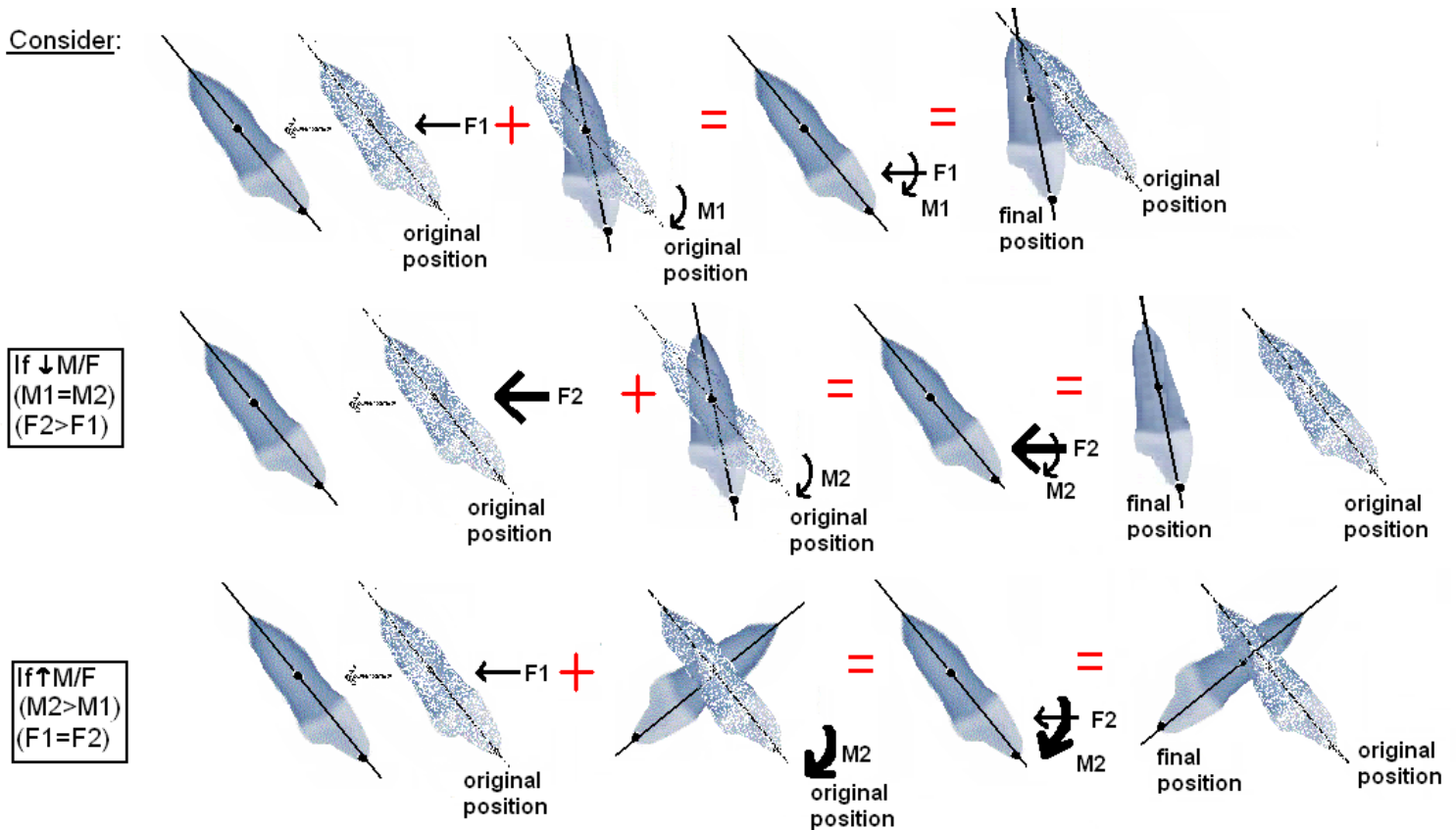


Figura 40: Efeitos da alteração da relação momento/força (M/F)

4. MOVIMENTOS QUANDO AS FORÇAS E SISTEMAS SÃO VARIADOS

Podemos aplicar o conhecimento adquirido na seção do sistema de força equivalente em situações da vida real, por exemplo, a retração dos incisivos. Utilizando o molar como ancoragem, não podemos apenas inserir um fio entre o incisivo e o molar e utilizar um elástico conectado a uma alça no fio para retrain, uma vez que esta situação resultará em inclinação descontrolada de ambos os dentes (o Centro de rotação estará muito próximo do centro de resistência). (Fig 41)

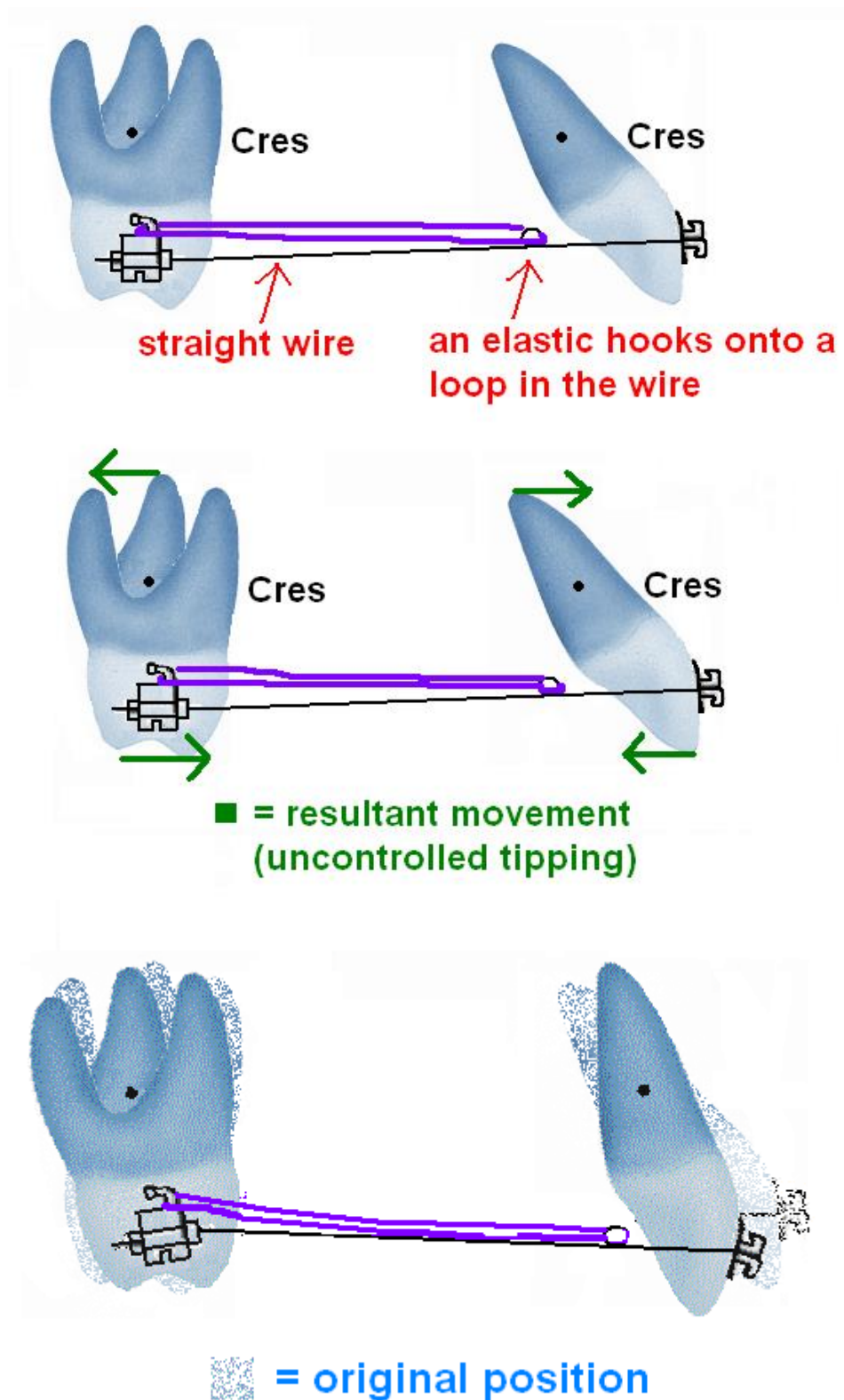


Figura 41: Retração do incisivo utilizando elástico na alça adicionada ao fio: resulta em inclinação descontrolada.

Para controlar o movimento precisamos adicionar um momento na coroa para atenuar o momento gerado pela força para produzir um movimento mais próximo possível da [translação](#) (veja sistema de força equivalente). Podemos produzir um momento na coroa do dente por meio de uma dobra no fio em uma posição tal que haverá uma

tendência do dente se inclinar de forma controlada quando o fio for inserido. O exemplo a seguir ilustra este conceito (Fig 42).

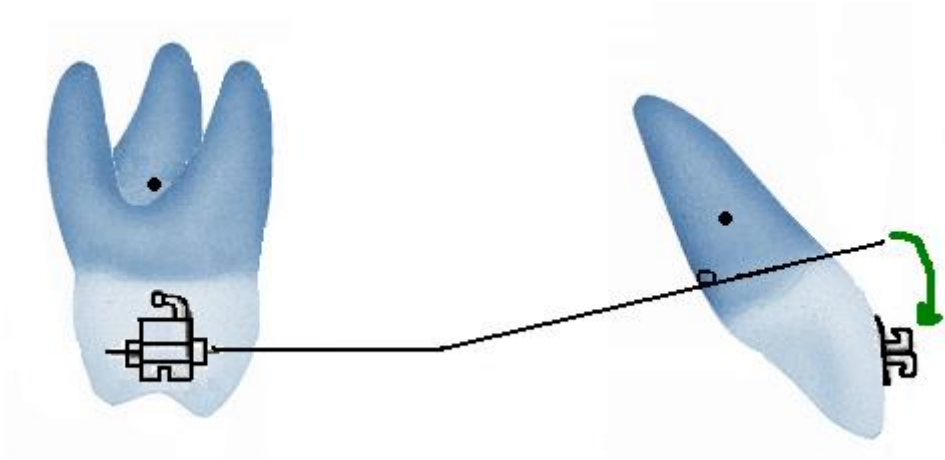
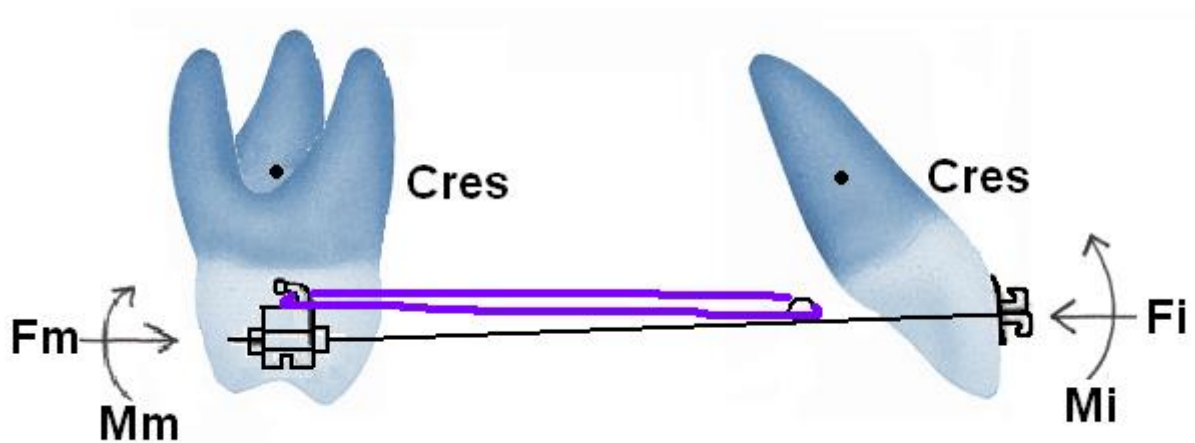


Figure 42: Momento gerado com a dobra no fio e uma força com a alça no arco

Para o arco se encaixar na canaleta do bráquete do incisivo, o fio deve ser levemente flexionado. Após a sua inserção produzirá as seguintes forças nos dois dentes em questão (F_m , M_m são as forças e momentos produzidos no molar ; F_i , M_i são as forças e momentos produzidos no incisivo).



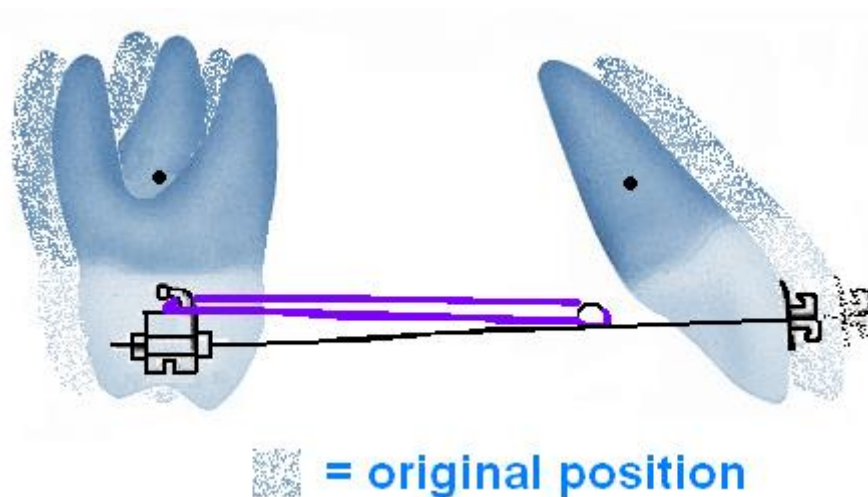


Figure 43: Movimento resultante da dobra e alça no arco durante a retração do incisivo (a inclinação é controlada)

Este exemplo demonstra que de acordo com a relação M/F podemos produzir o efeito de [translação](#) (Fig 43). A relação M/F pode ser ajustada de acordo com os objetivos do tratamento (algum grau de inclinação pode ser aceito). A relação M/F pode ser ajustada de acordo com a necessidade, o que facilita atingir os objetivos do tratamento devido ao melhor controle dos movimentos.

A relação M/F pode ser modificada não somente com a adição do elástico e dobras no arco. O tipo de elástico afetará a magnitude da força aplicada. Além disso, o tipo de fio (redondo ou retangular) assim como o seu diâmetro também poderá alterar a relação M/F.

Se utilizarmos um fio redondo ao invés de um fio retangular ocorrerá uma inclinação descontrolada, uma vez que o dente sofre uma rotação ao redor do arco (o fio gira dentro da canaleta) (Fig 44). Ao contrário, se utilizarmos um fio retangular o fio encontrará resistência (Fig 45). Como resultado, um momento será produzido durante a retração do incisivo que é contrário ao momento que causaria a inclinação descontrolada. Além disso, o tamanho da seção transversal do fio afetará o resultado. Um fio de seção transversal menor sofrerá maior deflexão comparado ao fio de maior calibre. Portanto, movimento de corpo (translação) requer fios de maior calibre, uma vez que resistem melhor à deformação e guia melhor o movimento.

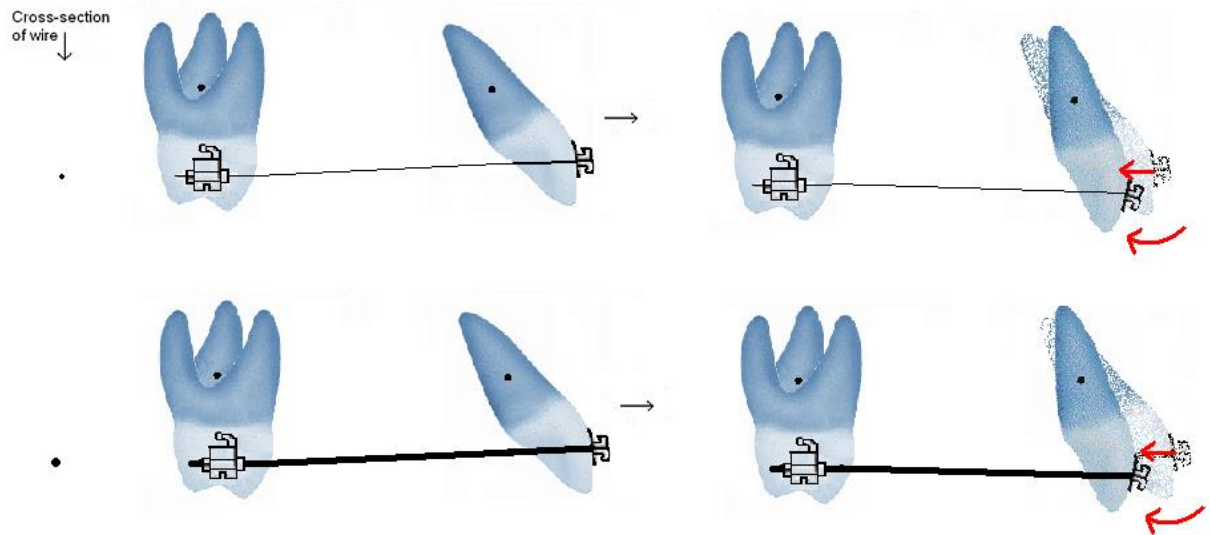


Figura 44: mecânica de deslizamento (retração de incisivos) com fio redondo de diferentes diâmetros

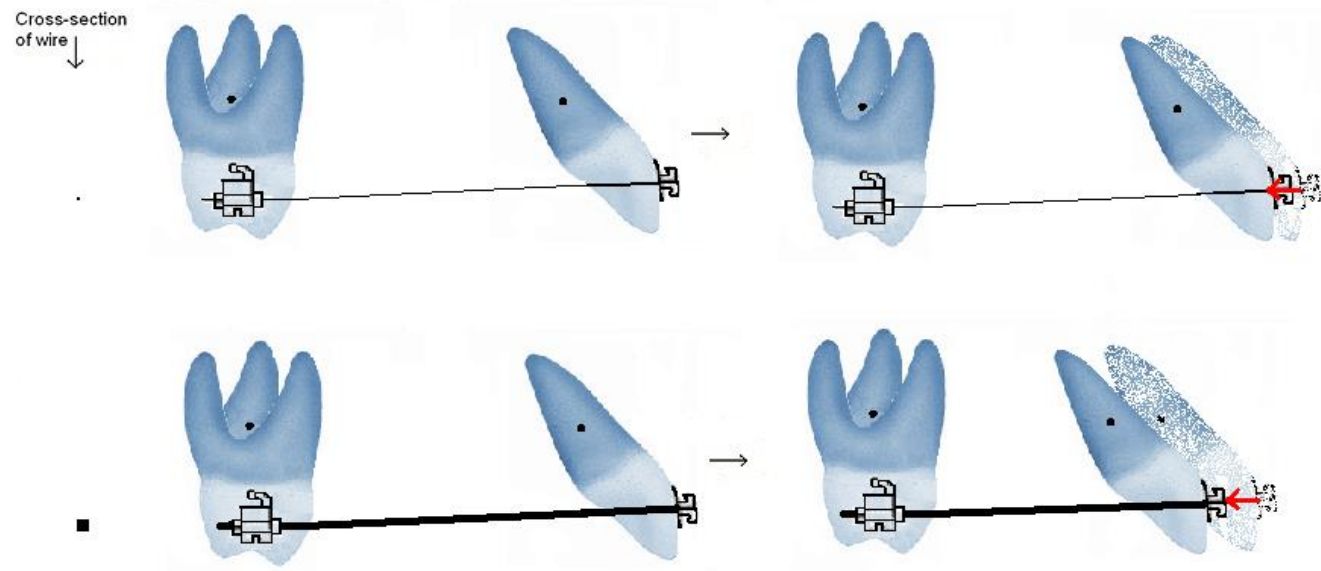
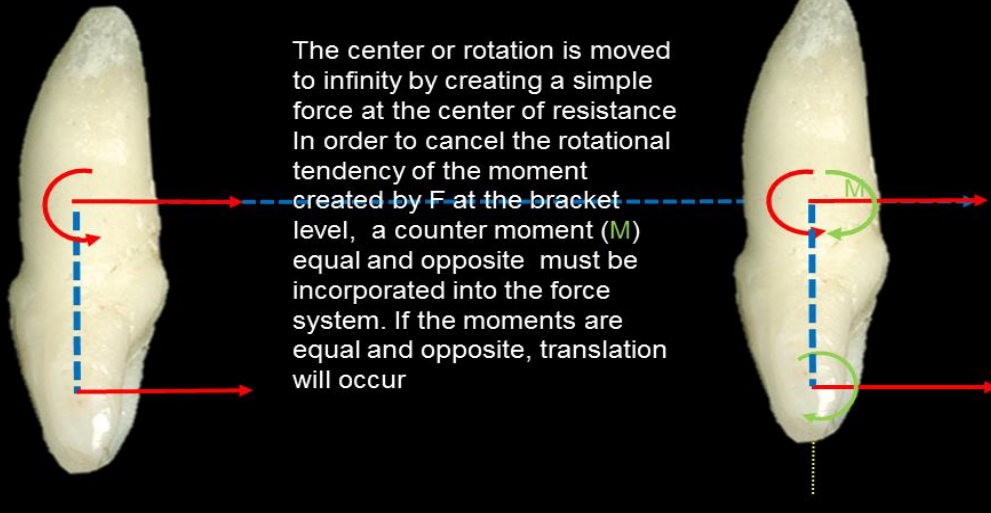


Figure 45: mecânica de deslizamento (retração de incisivos) com fios retangulares de diferentes calibres

5. SISTEMA DE FORÇA EQUIVALENTE

O sistema de força descrito acima também poderá ser descrito, ou transferido, para o [centro de resistência](#). Obviamente, instalar um acessório na altura do centro de resistência (superfície radicular) não é possível. A alternativa para esse problema é utilizar um sistema de força equivalente. Sistemas de forças são equivalentes quando produzem o mesmo efeito em todas as três dimensões (x,y,z) em um corpo (ou dente). Em ortodontia, sistemas de força são considerados equivalentes quando produzem o mesmo efeito independente do seu ponto de aplicação (bráquete/tubo).

Translation



A

Figura 46: exemplo de sistema de força equivalente

Qual o sistema de força produzirá em B o mesmo efeito ([translação](#)) produzido em A, onde o sistema de força em B é aplicado na coroa do dente e não no centro de resistência conforme ilustrado em A (Fig 46)? Utilizando conceitos descritos anteriormente, por exemplo, relação momento/força podemos resolver esse problema.

Ⓐ

$$F1 = -300g$$

$$\Sigma M = 0$$

Ⓑ

$$F2 = -300g$$

$$d = 10mm$$

$$M = F2 \times d = -3000g \text{ mm}$$

(this is the moment produced by the force F2 on the crown of the tooth)

Somente a força F2 produziria uma inclinação descontrolada do dente uma vez que há um [momento](#) agindo sobre o dente, com o centro de rotação próximo ao centro de resistência. Portanto, para produzir um movimento de translação no sistema B que seja equivalente ao Sistema A, um [momento](#) de direção oposta deverá ser aplicado na coroa, de forma que a soma dos momentos no Sistema B seja igual a zero (semelhante ao Sistema A). Assim, o momento será $M = +3000g \text{ mm}$.

Exemplo: Considere o sistema de força equivalente necessário ao movimento radicular (Fig 47).

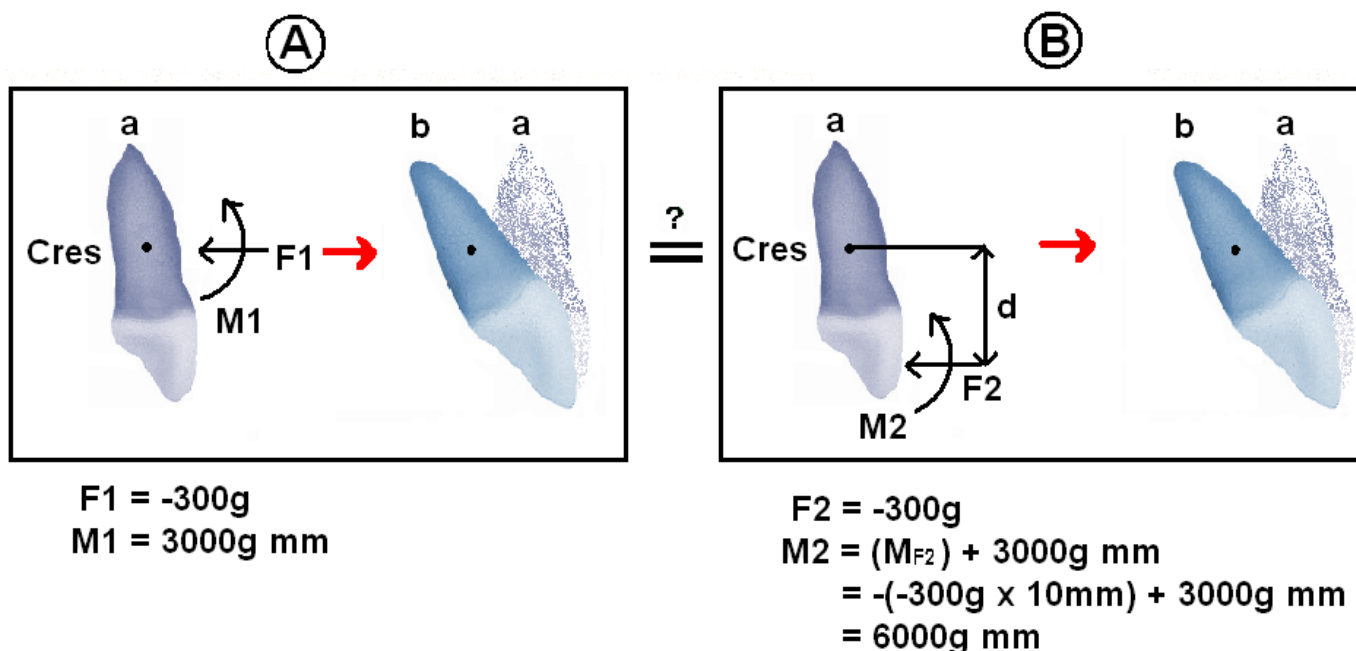


Figura 47: Cálculos para determinar o sistema de força do movimento radicular

Neste exemplo, o Sistema A possui uma força e um momento com ação no [centro de resistência](#) para produzir o movimento radicular desejado. No Sistema B há um momento associado com a Força $F2$ (uma vez que $F2$ é aplicada na coroa e não no centro de resistência), a qual precisa anulado para controle do centro de rotação. Para produzir uma inclinação controlada um momento deverá ser adicionado no dente para que o resultado no Sistema B seja equivalente ao sistema A.

Algumas dicas para melhor controle do movimento:

- * **É melhor ajustar o momento , não a força.**
- a. Para inclinação controlada, reduza o momento (M/F reduzida)
- b. Para [translação](#), ajuste o momento de maneira a obter o sistema de força equivalente
- c. Aumente a ancoragem da coroa para movimento radicular (ou seja, aumente o momento)
- d. A translação poderá ocorrer apenas aumentando a força sobre o corpo.

A relação M/F no [centro de resistência](#) determina o efeito sobre o ligamento periodontal. Na área de tensão do LP (direção oposta ao movimento dentário)

ocorrerá aposição óssea, e no lado de compressão do LP teremos reabsorção (direção do movimento dentário).

Lembre-se que a magnitude da relação M/F depende do comprimento radicular/morfologia óssea (a distância do bráquete ao centro de resistência pode variar). Por exemplo, dentes com raízes mais curtas requerem uma relação M/F menor para translação, quando comparados aos dentes com raízes mais longas.

9. ANCORAGEM

A ancoragem em ortodontia é considerada um fator relevante, pois é considerada a resistência aos movimentos dentários indesejáveis. A Primeira Lei de Newton é vital para a discussão da ancoragem. Todo aparelho encontra-se em equilíbrio estático. Portanto, o sistema de força utilizado para mover um dente ou grupo de dentes também terá ação no sistema de ancoragem. A ancoragem pode ser intra-arco, inter-arco ou extra-oral, cada qual proporcionando diferentes magnitudes de estabilidade ou resistência aos movimentos indesejados. Por exemplo, os dentes, o palato, forças do sistema estomatognático, implantes, e estruturas extra-orais podem ser utilizadas como ancoragem.

A quantidade de ancoragem necessária depende do plano de tratamento. Por exemplo, para fechar o espaço da extração há basicamente três opções: retração do segmento anterior (dentes posteriores mantidos em posição), retração dos dentes anteriores e avanço dos dentes posteriores, ou somente avanço dos dentes posteriores.

A ancoragem máxima pode ser obtida com o uso de implantes (minimplantes, palatino), e aparelhos extra-orais (arco extra-oral). A ancoragem máxima ocorre quando a unidade de ancoragem não se move, enquanto a unidade ativa se movimenta. A ancoragem máxima é difícil de se obter somente com aparelhos intra-orais (sem implantes) pois sempre haverá uma resposta dento-alveolar na unidade de ancoragem. Um exemplo de aparelhos intra-orais que proporcionam uma boa ancoragem (embora não comparável com outras alternativas de ancoragem máxima) é o aparelho de Herbst.

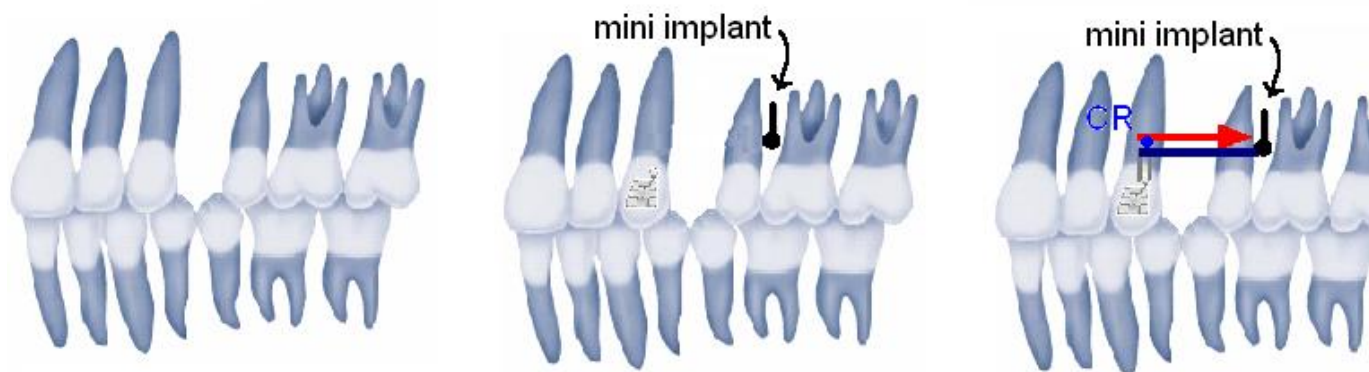


Figura 48: Uso de minimplantes para retração dos caninos.

O uso de minimplantes se tornou bastante popular na ortodontia. O exemplo seguinte mostra como um canino pode ser distalizado por translação utilizando um minimplante (Fig 48). Nesse caso, o movimento de distalização ocorre porque a linha de ação da força passa próximo ao [centro de resistência](#). Observe que os implantes (especialmente aqueles inseridos por vestibular) apresentam um movimento indesejado em outro plano. Isto pode ser evitado utilizando o fio adequado (veja o texto sobre fios).

A ancoragem moderada ocorre quando é permitido algum grau de movimento da unidade de ancoragem. Normalmente é obtida com aparelhos intra-orais ou grupo de dentes.

A combinação de ancoragem máxima e moderada pode ser utilizada. Por exemplo, no caso de extração do segundo pré-molar superior com a distalização do primeiro pré-molar sem que ocorra a mesialização do primeiro molar; podemos conjugar o primeiro molar ao segundo molar. Para retraindo todo o segmento anterior é necessário aumentar a ancoragem. Para isso, podemos adicionar um aparelho extra-oral. O sistema de ancoragem pode ser reforçado com o aumento do número de dentes unidos rigidamente, ou adicionando ancoragem extra-oral, de acordo com os objetivos do tratamento.

O movimento recíproco é uma situação onde não há unidade de ancoragem, por exemplo, o fechamento de um diastema (Fig 49).

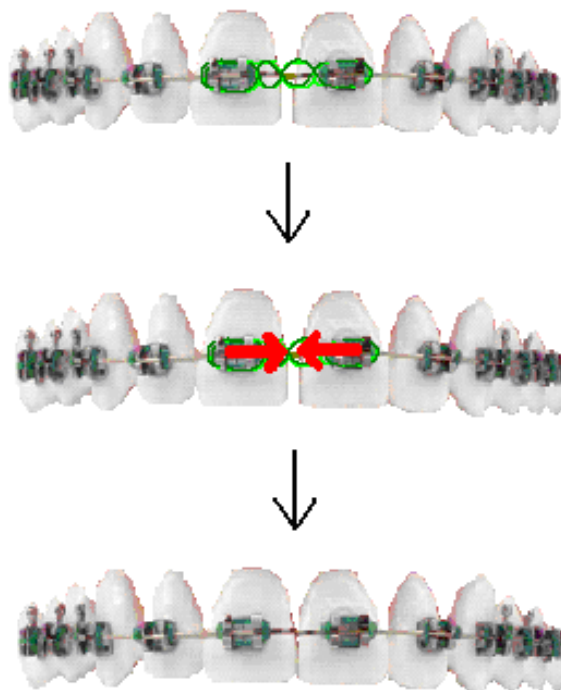


Figura 49: movimento recíproco para o fechamento de diastema

1. APLICAÇÕES

1. Retração do Canino

Para fechar o espaço proveniente da extração de um pré-molar, podemos retrair o canino e a seguir os incisivos, ou realizar a retração em massa dos seis dentes anteriores. Para demonstrar a biomecânica da retração, utilizaremos a retração do canino. O dente é submetido a uma força distal guiado pelo arco. Uma vez que a linha de ação da força passa por oclusal ao [centro de resistência](#) há uma tendência de inclinação do dente. Essa inclinação é anulada pelas forças geradas entre a interface fio/ bráquete, resultando em apenas uma pequena alteração na angulação do longo eixo do dente. O momento produzido depende da espessura da secção transversa do fio. O arco deverá preencher totalmente a canaleta do bráquete para produzir o momento necessário. O resultado dessa ação é a retração do canino, o qual ao final deverá apresentar um paralelismo radicular com os dentes adjacentes.

2. Extrusão para aumento da coroa clínica e instalação de implantes

A movimentação dentária é parte não só da ortodontia, mas também de outras especialidades. Por exemplo, se houver necessidade de aumento da coroa clínica de um dente com finalidades protéticas (por exemplo regiões anteriores esteticamente sensíveis), a extrusão ortodôntica pode ser uma opção. A extrusão ortodôntica poderá ser rápida ou lenta, dependendo dos objetivos do tratamento, e são obtidas de acordo com a mecânica empregada (forças). Por exemplo, a extrusão ortodôntica pode ser realizada para preparar o local para receber um implante.

10. LEITURA RECOMENDADA

Andrews, L. F. (1979). "The straight-wire appliance." British Journal of Orthodontics **6**(3): 125-143.

Antoszewska, J. and N. Küçükkeles (2011). Biomechanics of Tooth-Movement: Current Look at Orthodontic Fundamental, INTECH Open Access Publisher.

Barlow, M. and K. Kula (2008). "Factors influencing efficiency of sliding mechanics to close extraction space: a systematic review." Orthodontics & craniofacial research **11**(2): 65-73.

Beertsen, W., C. A. McCulloch and J. Sodek (1997). "The periodontal ligament: a unique, multifunctional connective tissue." Periodontology 2000 **13**(1): 20-40.

Begg, P. R. (1954). "Stone Age man's dentition: with reference to anatomically correct occlusion, the etiology of malocclusion, and a technique for its treatment." American Journal of Orthodontics **40**(4): 298-312.

Bridges, T., G. King and A. Mohammed (1988). "The effect of age on tooth movement and mineral density in the alveolar tissues of the rat." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **93**(3): 245-250.

Brudvik, P. and P. Rygh (1993). "The initial phase of orthodontic root resorption incident to local compression of the periodontal ligament." The European Journal of Orthodontics **15**(4): 249-263.

Burstone, C. J. (1962). "Rationale of the segmented arch." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **48**(11): 805-822.

Burstone, C. J. (2011). "Application of bioengineering to clinical orthodontics." Orthodontics-E-Book: Current Principles and Techniques: 345.

Burstone, C. J. and H. A. Koenig (1974). "Force systems from an ideal arch." American journal of orthodontics **65**(3): 270-289.

Burstone, C. J. and H. A. Koenig (1988). "Creative wire bending—the force system from step and V bends." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **93**(1): 59-67.

Burstone, C. J. and R. J. Pryputniewicz (1980). "Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces." American journal of orthodontics **77**(4): 396-409.

Cahill, D. R. and S. C. Marks (1980). "Tooth eruption: evidence for the central role of the dental follicle." Journal of Oral Pathology & Medicine **9**(4): 189-200.

Cai, Y., X. Yang, B. He and J. Yao (2015). "Finite element method analysis of the periodontal ligament in mandibular canine movement with transparent tooth correction treatment." BMC oral health **15**(1): 106.

Caputo, M., C. Di Luzio, A. Bellisario, F. Squillace and M. L. Favale (2017). "Evaluation Of The Effectiveness Of Clear Aligners Therapy In Orthodontic Tooth Movement."

Castroflorio, T., F. Garino, A. Lazzaro and C. Debernardi (2013). "Upper-incisor root control with Invisalign appliances." J Clin Orthod **47**(6): 346-351.

Chen, G., F. Teng and T.-M. Xu (2016). "Distalization of the maxillary and mandibular dentitions with miniscrew anchorage in a patient with moderate Class I bimaxillary dentoalveolar protrusion." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **149**(3): 401-410.

Choy, K., E.-K. Pae, K.-H. Kim, Y. C. Park and C. J. Burstone (2002). "Controlled space closure with a statically determinate retraction system." The Angle Orthodontist **72**(3): 191-198.

Cobo, J., A. Sicilia, J. Argüelles, D. Suárez and M. Vijande (1993). "Initial stress induced in periodontal tissue with diverse degrees of bone loss by an orthodontic force: tridimensional analysis by means of the finite element method." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **104**(5): 448-454.

Cope, J. (2011). "An interview with Jason Cope." Dental Press Journal of Orthodontics **16**(2): 36-46.

Epstein, M. B. (2002). Benefits and rationale of differential bracket slot sizes: the use of 0.018-inch and 0.022-inch slot sizes within a single bracket system.

Fiorelli, G., B. Melsen and C. Modica (2001). "Differentiated orthodontic mechanics for dental midline correction." Journal of clinical orthodontics: JCO **35**(4): 239.

Garino, F., T. Castroflorio, S. Daher, S. Ravera, G. Rossini, G. Cugliari and A. Deregibus (2016). "Effectiveness of composite attachments in controlling upper-molar movement with aligners." J Clin Orthod **50**(6): 341-347.

Gebeck, T. R. and L. L. Merrifield (1995). "Orthodontic diagnosis and treatment analysis—concepts and values. Part I." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **107**(4): 434-443.

Gebeck, T. R. and L. L. Merrifield (1995). "Orthodontic diagnosis and treatment analysis—concepts and values: part II." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **107**(5): 541-547.

Geramy, A., K. Tanne, M. Moradi, H. Golshahi and Y. Farajzadeh Jalali (2016). "Finite element analysis of the convergence of the centers of resistance and rotation in extreme moment-to-force ratios." Int Orthod **14**(2): 161-170.

Geron, S., R. Romano and T. Brosh (2004). "Vertical forces in labial and lingual orthodontics applied on maxillary incisors—a theoretical approach." The Angle Orthodontist **74**(2): 195-201.

Giancotti, A. and A. A. Gianelly (2001). "Three-Dimensional Control in Extraction Cases Using a Bidimensional Approach." World Journal of Orthodontics **2**(2).

Giancotti, A., P. Mozzicato and M. Greco (2012). "En masse retraction of the anterior teeth using a modified bidimensional technique." Journal of Clinical Orthodontics **46**(5): 267.

Jacobs, R. and D. v. Steenberghe (1994). "Role of periodontal ligament receptors in the tactile function of teeth: a review." Journal of periodontal research **29**(3): 153-167.

Kim, S.-J., J.-W. Kim, T.-H. Choi and K.-J. Lee (2014). "Combined use of miniscrews and continuous arch for intrusive root movement of incisors in Class II division 2 with gummy smile." The Angle Orthodontist **84**(5): 910-918.

Koenig, H. A. and C. J. Burstone (1989). "Force systems from an ideal arch—large deflection considerations." The Angle Orthodontist **59**(1): 11-16.

Kojima, Y. and H. Fukui (2014). "A finite element simulation of initial movement, orthodontic movement, and the centre of resistance of the maxillary teeth connected with an archwire." European Journal of Orthodontics **36**(3): 255-261.

Krishnan, V. and Z. e. Davidovitch (2006). "Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **129**(4): 469. e461-469. e432.

Kurol, J. and P. Owman-Moll (1998). "Hyalinization and root resorption during early orthodontic tooth movement in adolescents." The Angle orthodontist **68**(2): 161-166.

Kusy, R. P. and J. C. Tulloch (1986). "Analysis of moment/force ratios in the mechanics of tooth movement." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **90**(2): 127-131.

Lavigne, G., J. Kim, C. Valiquette and J. Lund (1987). "Evidence that periodontal pressoreceptors provide positive feedback to jaw closing muscles during mastication." Journal of Neurophysiology **58**(2): 342-358.

Lekic, P. and C. McCulloch (1996). "Periodontal ligament cell populations: the central role of fibroblasts in creating a unique tissue." The Anatomical Record **245**(2): 327-341.

Lindauer, S. J. (2001). The basics of orthodontic mechanics. Seminars in Orthodontics, Elsevier.

McCulloch, C. A. and S. Bordin (1991). "Role of fibroblast subpopulations in periodontal physiology and pathology." Journal of periodontal research **26**(3): 144-154.

Mcculloch, C. A., P. Lekic and M. D. Mckee (2000). "Role of physical forces in regulating the form and function of the periodontal ligament." Periodontology 2000 **24**(1): 56-72.

Meling, T. R., J. Ødegaard and E. Ø. Meling (1997). "On mechanical properties of square and rectangular stainless steel wires tested in torsion." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **111**(3): 310-320.

Melsen, B. (1999). "Biological reaction of alveolar bone to orthodontic tooth movement." The Angle orthodontist **69**(2): 151-158.