FACULDADE SETE LAGOAS - FACSETE

Especialização em Ortodontia

Paula Narelle Sertão de Lima Eça

Thainá Ribeiro Santos

INTERAÇÃO ENTRE FIOS ORTODÔNTICOS E BRAQUETES: FUNDAMENTOS BIOMECÂNICOS, RESISTÊNCIA AO DESLIZAMENTO E REPERCUSSÕES CLÍNICAS:

Uma Revisão de Literatura

Vitória da Conquista - Ba

2025

Paula Narelle Sertão de Lima Eça

Thainá Ribeiro Santos

INTERAÇÃO ENTRE FIOS ORTODÔNTICOS E BRAQUETES: FUNDAMENTOS BIOMECÂNICOS, RESISTÊNCIA AO DESLIZAMENTO E REPERCUSSÕES CLÍNICAS:

Uma Revisão de Literatura

Monografia apresentada ao curso de especialização Lato Sensu da Faculdade Sete Lagoas - FACSETE, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Ortodontia.

Orientador: Prof. Geraldo José Correa

Área de concentração: Ortodontia

Vitória da Conquista - Ba

2025

FACSETE
Faculdade Sete Lagoas
Recredenciamento Portaria MEC 278/2016 - D.O.U 19/04/2016

Paula Narelle Sertão de Lima Eça

Thainá Ribeiro Santos

INTERAÇÃO ENTRE FIOS ORTODÔNTICOS E BRAQUETES: FUNDAMENTOS BIOMECÂNICOS, RESISTÊNCIA AO DESLIZAMENTO E REPERCUSSÕES CLÍNICAS – REVISÃO DA LITERATURA

Monografia apresentada ao curso de pós-graduação em Ortodontia da Faculdade Sete Lagoas, como forma de obtenção do título de Especialista em Ortodontia.

Aprovado em 11/12/2025

BANCA EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
SISENANDO ITABAIANA SOBRINHO
Data: 03/03/2026 13:41:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Sisenando Itabaiana Sobrinho

Coordenador

gov.br Documento assinado digitalmente
GERALDO JOSE CORREA
Data: 02/03/2026 16:40:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Geraldo José Correa

Orientador

gov.br Documento assinado digitalmente
SISENANDO ITABAIANA SOBRINHO
Data: 03/03/2026 13:36:41-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Sisenando Itabaiana Sobrinho

Professor convidado

Vitória da Conquista - Ba

2025

RESUMO

A movimentação dentária ortodôntica constitui um processo biomecânico e biológico complexo que depende da aplicação controlada de forças capazes de induzir remodelação óssea alveolar e reorganização do ligamento periodontal. A eficiência desse processo está diretamente relacionada à capacidade de transmissão das forças aplicadas pelo sistema ortodôntico. Durante mecânicas de deslizamento, amplamente utilizadas no fechamento de espaços e retração dentária, ocorre o deslocamento do braquete ao longo do fio ortodôntico, gerando forças resistivas que se opõem ao movimento, denominadas resistência ao deslizamento. Do ponto de vista tribológico, essa resistência resulta da interação entre superfícies em contato e representa um dos principais fatores limitantes da eficiência biomecânica ortodôntica. Estudos demonstram que entre 12% e 60% da força aplicada pode ser dissipada devido a esse fenômeno. Evidências científicas indicam que a resistência ao deslizamento é composta por três componentes principais: atrito clássico, binding e notching. O atrito clássico ocorre quando o fio está passivamente posicionado na canaleta do braquete, enquanto o binding resulta da angulação entre fio e braquete, promovendo aumento da força normal e da resistência ao movimento. O notching representa o estágio mais avançado, caracterizado por deformação plástica permanente que pode impedir o deslocamento dentário. Entre esses componentes, o binding é considerado o principal determinante da resistência ao deslizamento em condições clínicas. Diversos fatores influenciam esse fenômeno, incluindo o material do fio e do braquete, método de ligadura, dimensões do sistema, rugosidade superficial, propriedades mecânicas dos materiais e presença de saliva. Assim, a compreensão dos mecanismos envolvidos é fundamental para otimizar a biomecânica ortodôntica, melhorar a eficiência do tratamento e aumentar a previsibilidade dos resultados clínicos. O presente estudo consiste em uma revisão de literatura que tem como objetivo analisar os princípios físicos do atrito ortodôntico, os componentes da resistência ao deslizamento e suas implicações clínicas.

Palavras-chave: atrito ortodôntico; resistência ao deslizamento**;** biomecânica ortodôntica; binding; notching; fios ortodônticos.

ABSTRACT

Orthodontic tooth movement is a complex biomechanical and biological process that depends on the controlled application of forces capable of inducing alveolar bone remodeling and periodontal ligament reorganization. The efficiency of this process is directly related to the ability of the orthodontic system to transmit the applied forces effectively. During sliding mechanics, widely used for space closure and tooth retraction, the bracket moves along the orthodontic archwire, generating resistive forces that oppose movement, known as resistance to sliding. From a tribological perspective, this resistance results from the interaction between contacting surfaces and represents one of the main limiting factors in orthodontic biomechanical efficiency. Studies have shown that between 12% and 60% of the applied force may be dissipated due to this phenomenon. Scientific evidence indicates that resistance to sliding consists of three main components: classical friction, binding, and notching. Classical friction occurs when the archwire is passively positioned within the bracket slot, whereas binding results from angulation between the archwire and bracket, increasing the normal force and resistance to movement. Notching represents the most advanced stage and is characterized by permanent plastic deformation that may prevent tooth displacement. Among these components, binding is considered the primary determinant of resistance to sliding under clinical conditions. Several factors influence this phenomenon, including archwire and bracket material, ligation method, system dimensions, surface roughness, mechanical properties of materials, and the presence of saliva. Therefore, understanding the tribological mechanisms involved is essential to optimize orthodontic biomechanics, improve treatment efficiency, and increase the predictability of clinical outcomes. This study consists of a literature review aimed at analyzing the physical principles of orthodontic friction, the components of resistance to sliding, and their clinical implications.

Keywords: orthodontic friction; resistance to sliding; orthodontic biomechanics; binding; notching; orthodontic archwires.

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO** 07
2 **JUSTIFICATIVA** 09
3 **OBJETIVOS** 09
3.1 **Objetivo geral** 09
3.2 **Objetivos específicos**.....09
4 **REVISÃO DE LITERATURA** 10
4.1 Conceito físico do atrito.....10
4.2 Resistência ao deslizamento 10
4.3 Biding..... 10
4.4 Notching 11
4.5 Influência do material do fio 12
4.6 Influência do material do braquete 12
4.7 Influência do biofilme no atrito ortodôntico 14
5. **IMPLICAÇÕES CLÍNICAS**.....14
6. **DISCUSSÃO** 16
7. **CONCLUSÃO** 18
8. **REFERÊNCIAS** 20

1. INTRODUÇÃO

A movimentação dentária ortodôntica constitui um processo biomecânico e biológico complexo, no qual a aplicação de forças mecânicas controladas induz remodelação óssea alveolar e reorganização do ligamento periodontal, permitindo o deslocamento dentário dentro do osso alveolar. Esse processo é mediado por respostas celulares que incluem ativação de osteoclastos e osteoblastos, liberação de mediadores inflamatórios e reorganização estrutural do tecido conjuntivo periodontal (1–3). A eficiência dessa movimentação depende não apenas da magnitude e direção da força aplicada, mas também da eficiência da transmissão dessa força através do sistema ortodôntico (4).

Nas mecânicas de deslizamento, amplamente utilizadas na retração de dentes anteriores e no fechamento de espaços pós-exodontia, o movimento dentário ocorre por meio do deslocamento do braquete ao longo do fio ortodôntico (5). Durante esse processo, surgem forças resistivas que se opõem ao movimento relativo entre essas estruturas, fenômeno denominado resistência ao deslizamento. Esse fenômeno representa um dos principais fatores limitantes da eficiência biomecânica ortodôntica (6,7).

Do ponto de vista físico, o atrito é um fenômeno tribológico que resulta da interação entre superfícies em contato. Mesmo superfícies aparentemente lisas apresentam irregularidades microscópicas denominadas asperidades. Quando essas superfícies entram em contato sob ação de uma força normal, ocorre deformação dessas asperidades e formação de pontos de contato reais. A aplicação de uma força tangencial resulta em resistência ao movimento devido à deformação elástica, deformação plástica e forças adesivas intermoleculares (8,9).

No contexto ortodôntico, essa interação ocorre entre o fio ortodôntico e a canaleta do braquete, formando um sistema tribológico altamente complexo (6). Estudos experimentais demonstraram que uma parcela significativa da força ortodôntica aplicada é dissipada devido à resistência ao deslizamento, podendo variar entre 12% e 60%, dependendo do tipo de material, angulação e sistema de ligadura utilizado (6,10).

Historicamente, o atrito foi considerado o principal componente dessa resistência. Entretanto, evidências científicas mais recentes demonstraram que a resistência ao deslizamento é composta por três componentes biomecânicos distintos (6,11):

• Atrito clássico;
• Binding;
• Notching.

O atrito clássico ocorre quando o fio está passivamente posicionado na canaleta do braquete, sem contato com suas bordas. O binding ocorre quando há angulação entre o fio e o braquete, promovendo contato com as bordas da canaleta e gerando forças normais adicionais. O notching representa o estágio mais avançado, caracterizado por deformações permanentes que impedem o movimento (6,11,12).

Entre esses componentes, o binding é considerado o principal fator responsável pela resistência ao deslizamento em condições clínicas reais, uma vez que pequenas angulações dentárias são inevitáveis durante o tratamento ortodôntico (6,13).

Além disso, diversos fatores influenciam a magnitude da resistência ao deslizamento, incluindo:

• Material do fio ortodôntico (14);
• Material do braquete (15);
• Método de ligadura (16);
• Dimensões do fio e da canaleta (6);
• Rugosidade superficial (14,15);
• Angulação entre fio e braquete (6,13);
• Propriedades mecânicas dos materiais (14);
• Presença de saliva (17).

A compreensão desses fatores é essencial para otimizar a biomecânica ortodôntica, reduzir o tempo de tratamento e melhorar a previsibilidade dos resultados clínicos (4,6,7).

2. JUSTIFICATIVA

O controle biomecânico adequado é um dos pilares fundamentais do tratamento ortodôntico. A resistência ao deslizamento influencia diretamente a magnitude da força efetivamente transmitida ao dente, podendo comprometer a eficiência da movimentação dentária.

A dissipação de força causada pelo atrito pode resultar na necessidade de aplicação de forças maiores, o que pode aumentar o risco de efeitos colaterais indesejáveis, incluindo:

• Reabsorção radicular externa;
• Perda de ancoragem;
• Movimentação dentária indesejada;
• Aumento do tempo de tratamento.

Além disso, o desenvolvimento de novos materiais ortodônticos, como fios de beta-titânio e braquetes autoligáveis, torna necessária uma compreensão aprofundada dos mecanismos tribológicos envolvidos.

Assim, a presente revisão se justifica pela necessidade de consolidar o conhecimento científico sobre o atrito ortodôntico e suas implicações clínicas.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Revisar a literatura científica sobre o atrito entre fios ortodônticos e braquetes e suas implicações biomecânicas e clínicas.

3.2 Objetivos específicos

• Descrever os princípios físicos do atrito;
• Analisar os componentes da resistência ao deslizamento;
• Avaliar os fatores que influenciam o atrito ortodôntico;
• Comparar diferentes materiais ortodônticos;
• Discutir as implicações clínicas do atrito.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Conceito físico do atrito

O atrito é definido como a força resistiva que se opõe ao movimento relativo entre duas superfícies em contato. Esse fenômeno pode ser descrito pela equação:

$$\boldsymbol{F = \mu N}$$

onde:

F = força de atrito
μ = coeficiente de atrito
N = força normal

O coeficiente de atrito depende das propriedades dos materiais, incluindo:

• Rugosidade superficial;
• Dureza;
• Módulo de elasticidade;
• Energia superficial.

Em Ortodontia, a força normal é influenciada pela angulação entre fio e braquete e pelo sistema de ligadura utilizado.

4.2 Resistência ao deslizamento

A resistência ao deslizamento representa a soma das forças resistivas que se opõem ao movimento dentário.

Pode ser descrita como:

$$RS = F_{atrito} + F_{binding} + F_{notching}$$

O atrito clássico representa apenas uma fração da resistência total, sendo o binding o principal componente em condições clínicas.

4.3 Binding

O binding ocorre quando o fio entra em contato com as bordas da canaleta devido à angulação entre o fio e o braquete. Esse fenômeno aumenta significativamente a força normal e, consequentemente, a resistência ao movimento.

A magnitude do binding depende de:

• Módulo de elasticidade do fio;
• Dimensão do fio;

• Dimensão da canaleta;
• Angulação dentária.

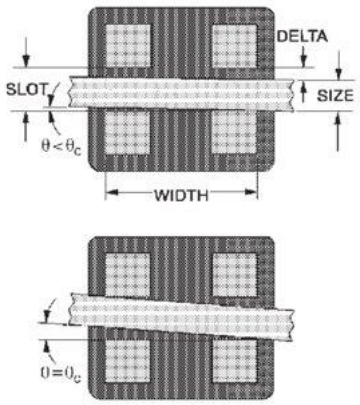


Figura 1. Representação esquemática do fenômeno de *binding*, caracterizado pelo contato entre o fio ortodôntico e as bordas da canaleta do braquete devido à angulação entre esses componentes, resultando no aumento da força normal e da resistência ao deslizamento.

4.4 Notching

O notching ocorre quando as tensões excedem o limite elástico do material, resultando em deformação permanente. Esse fenômeno pode bloquear completamente o movimento dentário.

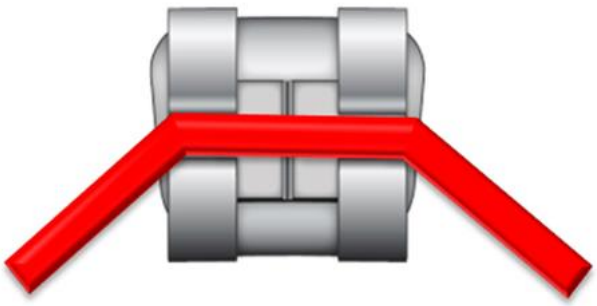


Figura 2. Representação esquemática do fenômeno de *notching*, caracterizado pela deformação plástica localizada do fio ortodôntico ou da canaleta do braquete, resultando em travamento mecânico e impedimento do deslizamento.

4.5 Influência do material do fio

Os principais materiais incluem:

- Aço inoxidável: apresenta menor coeficiente de atrito devido à sua superfície mais lisa e maior dureza.
- Níquel-titânio: apresenta coeficiente intermediário.
- Beta-titânio: apresenta maior coeficiente de atrito devido à maior rugosidade superficial.

4.6 Influência do material do braquete

O material do braquete constitui um fator determinante na magnitude da resistência ao deslizamento durante as mecânicas ortodônticas, uma vez que suas propriedades físicas e mecânicas influenciam diretamente a interação tribológica com o fio ortodôntico. Características como rugosidade superficial, dureza, composição química, energia superficial e capacidade de deformação elástica ou plástica desempenham papel fundamental na definição do coeficiente de atrito e da intensidade do fenômeno de binding.

Os braquetes metálicos (Fig. 3a), geralmente confeccionados em aço inoxidável, apresentam, de modo geral, os menores níveis de atrito quando comparados a outros materiais. Isso se deve à sua superfície relativamente lisa, elevada dureza e maior resistência à deformação, o que reduz a área de contato real entre o fio e a canaleta. Além disso, o aço inoxidável apresenta menor tendência à adesão mecânica e menor suscetibilidade a irregularidades superficiais permanentes, contribuindo para um deslizamento mais eficiente e previsível.

Por outro lado, os braquetes cerâmicos (Fig. 3b), apresentam coeficientes de atrito significativamente mais elevados. Esse comportamento é atribuído principalmente à maior rugosidade superficial inerente ao processo de fabricação cerâmico, bem como à sua maior fragilidade e menor capacidade de deformação elástica. Essas características favorecem o aumento do contato mecânico entre as asperidades do fio e da canaleta, elevando tanto o atrito clássico quanto o binding. Além disso, a natureza mais rígida e friável do material cerâmico pode favorecer o fenômeno de desgaste superficial e aumentar progressivamente a resistência ao deslizamento ao longo do tratamento.

Braquetes cerâmicos com canaletas metálicas representam uma alternativa intermediária, combinando a estética do corpo cerâmico com as propriedades tribológicas mais favoráveis do aço inoxidável na região de contato com o fio. Essa configuração reduz significativamente a resistência ao deslizamento quando comparada aos braquetes cerâmicos convencionais, uma vez que a interface fio-metal apresenta menor rugosidade e menor coeficiente de atrito.

Além disso, a interação entre o material do braquete e o material do fio deve ser considerada como um sistema integrado, pois o comportamento tribológico depende da combinação específica entre esses componentes. Por exemplo, a associação entre braquetes metálicos e fios de aço inoxidável apresenta os menores níveis de resistência ao deslizamento, enquanto combinações envolvendo braquetes cerâmicos e fios de beta-titânio tendem a apresentar os maiores valores de resistência.

Do ponto de vista clínico, a escolha do material do braquete deve equilibrar considerações estéticas e biomecânicas. Embora braquetes cerâmicos ofereçam vantagens estéticas significativas, sua maior resistência ao deslizamento pode comprometer a eficiência de mecânicas que envolvem movimentação por deslizamento, como retração anterior e fechamento de espaços. Portanto, o conhecimento das propriedades tribológicas dos diferentes materiais de braquetes é essencial para o planejamento biomecânico adequado, permitindo ao ortodontista selecionar o sistema mais apropriado para cada fase do tratamento e objetivo clínico específico.

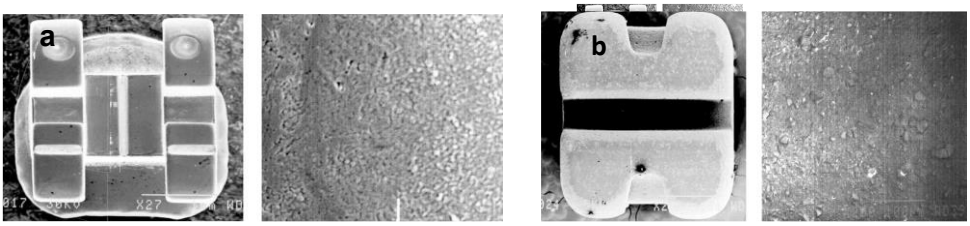


Figura 3. (a) Braquete metálico evidenciando irregularidades superficiais; (b) braquete cerâmico apresentando maior rugosidade superficial. As diferenças microestruturais entre os materiais influenciam diretamente o coeficiente de atrito e a resistência ao deslizamento no sistema ortodôntico.

4.7 Influência do biofilme no atrito ortodôntico

O biofilme oral representa um fator biológico relevante que pode influenciar significativamente o comportamento tribológico do sistema ortodôntico. Durante o tratamento ortodôntico fixo, a presença de braquetes, fios e ligaduras cria áreas retentivas que favorecem o acúmulo de biofilme bacteriano, constituído por microrganismos, matriz extracelular polimérica e componentes salivares. Esse biofilme altera as propriedades físicas e mecânicas das superfícies em contato, podendo modificar a magnitude da resistência ao deslizamento entre o fio ortodôntico e a canaleta do braquete (Figura 4).



Figura 4. Acúmulo de biofilme bacteriano ao redor de braquetes e fios ortodônticos durante o tratamento ortodôntico fixo. A presença de biofilme altera as propriedades tribológicas das superfícies em contato, podendo aumentar a rugosidade superficial, modificar o coeficiente de atrito e influenciar a resistência ao deslizamento entre o fio ortodôntico e a canaleta do braquete. (Fonte: arquivo próprio).

5. IMPLICAÇÕES CLÍNICAS

A resistência ao deslizamento constitui um dos principais determinantes da eficiência biomecânica durante o tratamento ortodôntico, influenciando

diretamente a qualidade, a previsibilidade e a velocidade da movimentação dentária. Esse fenômeno interfere na fração da força ortodôntica que é efetivamente transmitida ao ligamento periodontal, uma vez que parte da energia mecânica aplicada é dissipada na interface entre o fio ortodôntico e a canaleta do braquete. Como consequência, a resistência ao deslizamento exerce impacto direto sobre a eficiência da movimentação dentária, o tempo total de tratamento, o controle da ancoragem e a magnitude da força necessária para produzir o deslocamento dentário desejado.

Do ponto de vista biomecânico, a força efetiva transmitida ao dente pode ser expressa pela relação:

$$F_{efetiva} = F_{aplicada} - RS$$

onde $F_{efetiva}$ representa a força biologicamente disponível para induzir remodelação óssea e movimentação dentária, $F_{aplicada}$ corresponde à força ortodôntica inicialmente aplicada, e RS representa a resistência ao deslizamento. Esse modelo evidencia que, à medida que a resistência ao deslizamento aumenta, ocorre uma redução proporcional da força efetivamente transmitida aos tecidos de suporte dental.

Essa dissipação de força possui importantes implicações clínicas. Quando a resistência ao deslizamento é elevada, o ortodontista pode ser induzido a aplicar forças maiores para compensar as perdas mecânicas, o que pode resultar em efeitos colaterais indesejáveis, como aumento do risco de reabsorção radicular externa, sobrecarga dos dentes de ancoragem e movimentações dentárias indesejadas. Além disso, a redução da eficiência biomecânica pode prolongar o tempo de tratamento e comprometer a previsibilidade dos resultados clínicos.

Por outro lado, a otimização do sistema ortodôntico por meio da seleção adequada de materiais, controle da angulação entre fio e braquete, escolha apropriada do método de ligadura e utilização de fios com propriedades mecânicas compatíveis com a fase do tratamento pode reduzir significativamente a resistência ao deslizamento. Essa abordagem permite uma transmissão mais eficiente das forças ortodônticas, promovendo movimentação dentária mais controlada, fisiológica e eficiente, com menor risco de efeitos adversos e maior estabilidade dos resultados obtidos.

Dessa forma, a compreensão aprofundada dos fatores que influenciam a resistência ao deslizamento representa um elemento fundamental para o planejamento biomecânico racional, contribuindo diretamente para a eficiência, segurança e previsibilidade do tratamento ortodôntico.

6. DISCUSSÃO

A presente revisão evidencia que a resistência ao deslizamento no sistema ortodôntico não pode ser compreendida de forma simplificada apenas pelo modelo clássico do atrito descrito pela equação F = μN. Embora esse modelo seja didaticamente relevante, sua aplicação clínica é limitada, pois o ambiente ortodôntico configura um sistema tribológico complexo, dinâmico e biologicamente ativo. Dessa forma, a resistência ao deslizamento deve ser interpretada como o resultado da interação simultânea entre variáveis mecânicas, geométricas e biológicas.

Um dos principais avanços conceituais na literatura foi a distinção entre atrito clássico, binding e notching. Evidências experimentais demonstram que, em condições clínicas reais, o binding é o principal responsável pelo aumento da resistência ao deslizamento. Isso ocorre porque pequenas angulações dentárias são inevitáveis durante o alinhamento e a retração anterior, especialmente em mecânicas com controle tridimensional de torque. Nessas situações, o contato entre fio e bordas da canaleta aumenta significativamente a força normal, elevando exponencialmente a resistência ao movimento. Assim, a simples redução do coeficiente de atrito do material não elimina o principal componente resistivo quando há angulação crítica.

Outro ponto relevante refere-se à influência do módulo de elasticidade do fio. Fios mais rígidos, como os de aço inoxidável, apresentam menor deformação sob carga, reduzindo o grau de deflexão e, consequentemente, a intensidade do binding em determinadas situações clínicas. Por outro lado, fios de beta-titânio, apesar de oferecerem vantagens biomecânicas relacionadas à relação carga/deflexão, apresentam maior rugosidade superficial e maior tendência à adesão mecânica, aumentando a resistência ao deslizamento. Essa dualidade

reforça que a escolha do material deve considerar a fase do tratamento e o objetivo biomecânico pretendido.

A geometria do sistema também exerce papel determinante. A relação entre a dimensão do fio e da canaleta influencia diretamente o ângulo crítico de binding. Fios retangulares de maior calibre, quando utilizados em canaletas com pequena folga, atingem rapidamente o ângulo crítico, elevando substancialmente a resistência ao deslizamento. Portanto, o controle dimensional representa uma estratégia biomecânica essencial para modular a eficiência do deslizamento.

Além dos fatores mecânicos, o ambiente biológico modifica substancialmente o comportamento tribológico do sistema. A presença de saliva pode atuar como lubrificante, reduzindo o atrito clássico em determinadas circunstâncias. Contudo, o biofilme bacteriano tende a aumentar a rugosidade superficial e promover maior adesão entre as superfícies, elevando a resistência ao deslizamento ao longo do tempo clínico. Esse aspecto demonstra que resultados laboratoriais obtidos em condições secas nem sempre reproduzem fielmente o cenário intraoral.

Do ponto de vista clínico, a resistência ao deslizamento impacta diretamente a magnitude da força efetivamente transmitida ao dente, conforme expresso pela relação:

[F_efetiva = F_aplicada – RS]

Quando a resistência ao deslizamento é elevada, parte significativa da força aplicada é dissipada no sistema fio-braquete, exigindo aumento da força inicial para obtenção do movimento desejado. Entretanto, o incremento indiscriminado da força pode aumentar o risco de efeitos adversos, como reabsorção radicular externa e perda de ancoragem. Assim, a eficiência biomecânica não depende apenas da aplicação de maior força, mas da otimização do sistema para reduzir dissipações desnecessárias.

Outro aspecto relevante diz respeito aos sistemas autoligáveis. Embora frequentemente associados à redução do atrito clássico devido à ausência de ligaduras elásticas, estudos demonstram que, na presença de angulação significativa, o binding permanece como principal componente da resistência.

Portanto, os benefícios desses sistemas são mais evidentes em fases iniciais de alinhamento, quando o fio está passivamente posicionado na canaleta.

De maneira geral, os achados da literatura indicam que a resistência ao deslizamento deve ser interpretada como um fenômeno dependente da fase do tratamento ortodôntico. Em fases iniciais, o atrito clássico pode ter maior relevância; em fases de retração com controle de torque, o binding assume papel predominante; e, em situações de sobrecarga, pode ocorrer notching, comprometendo totalmente o movimento dentário.

Por fim, a análise integrada dos fatores mecânicos, geométricos e biológicos reforça que a escolha racional dos materiais ortodônticos deve ser individualizada, considerando objetivos clínicos específicos, tipo de mecânica empregada e características do paciente. A redução da resistência ao deslizamento não deve ser vista apenas como estratégia para acelerar o tratamento, mas como ferramenta para otimizar a previsibilidade biomecânica e minimizar efeitos colaterais.

7. CONCLUSÃO

A resistência ao deslizamento constitui um dos principais determinantes biomecânicos da eficiência da movimentação dentária ortodôntica, representando um fenômeno complexo que transcende o conceito clássico de atrito descrito por modelos físicos simplificados. Conforme evidenciado nesta revisão, sua natureza multifatorial resulta da interação dinâmica entre propriedades mecânicas dos materiais, características geométricas do sistema fio-braquete e condições biológicas do ambiente intraoral, configurando um sistema tribológico altamente complexo e clinicamente relevante.

A distinção conceitual entre atrito clássico, binding e notching representa um avanço fundamental na compreensão da mecânica ortodôntica contemporânea. Embora o atrito clássico desempenhe papel relevante, especialmente em fases iniciais do tratamento, o binding se destaca como o principal componente resistivo em condições clínicas reais, devido à inevitável presença de angulações entre o fio e o braquete durante o controle tridimensional da

movimentação dentária. Esse fenômeno aumenta significativamente a força normal entre as superfícies, elevando a resistência ao deslizamento e reduzindo a eficiência da transmissão de forças ao dente. Em situações extremas, o notching pode comprometer completamente o movimento dentário, evidenciando a importância do controle biomecânico adequado.

Os resultados analisados demonstram que a escolha dos materiais ortodônticos exerce influência decisiva sobre o comportamento tribológico do sistema. Fios com menor rugosidade superficial e maior rigidez, como os de aço inoxidável, tendem a apresentar menor resistência ao deslizamento em determinadas fases do tratamento, enquanto fios com maior rugosidade e menor módulo de elasticidade, como os de beta-titânio, podem aumentar a dissipação de forças, apesar de suas vantagens biomecânicas específicas. Da mesma forma, a relação dimensional entre fio e canaleta, o tipo de ligadura e as propriedades superficiais dos braquetes constituem variáveis críticas que devem ser cuidadosamente consideradas no planejamento ortodôntico.

Além dos aspectos mecânicos e geométricos, o ambiente biológico desempenha papel fundamental na modulação da resistência ao deslizamento. A presença de saliva, biofilme e variações funcionais intraorais modifica continuamente as condições tribológicas do sistema, reforçando que o comportamento observado em condições laboratoriais nem sempre reflete fielmente a realidade clínica. Essa interação entre fatores físicos e biológicos evidencia o caráter dinâmico e adaptativo do sistema ortodôntico.

Do ponto de vista clínico, a resistência ao deslizamento influencia diretamente a magnitude da força efetivamente transmitida ao dente, afetando a eficiência do movimento, o controle da ancoragem e o risco de efeitos adversos, como reabsorção radicular e perda de controle mecânico. Assim, a otimização biomecânica não depende do aumento indiscriminado da força aplicada, mas da seleção racional dos materiais e da configuração do sistema ortodôntico, com o objetivo de maximizar a eficiência da transmissão de forças e minimizar dissipações indesejáveis.

Portanto, conclui-se que a resistência ao deslizamento deve ser compreendida como um fenômeno biomecânico multifatorial e dependente da fase do

tratamento, cuja adequada compreensão é essencial para o planejamento ortodôntico baseado em princípios científicos. A aplicação desse conhecimento permite maior previsibilidade clínica, melhor controle da movimentação dentária, maior eficiência terapêutica e redução dos efeitos colaterais, contribuindo para tratamentos mais seguros, eficazes e biologicamente compatíveis.

8. REFERÊNCIAS

1. Krishnan V, Davidovitch Z. Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006;129(4):469.e1-32.
2. Proffit WR, Fields HW, Sarver DM. *Contemporary Orthodontics.* 5th ed. St Louis: Mosby; 2013.
3. Meikle MC. The tissue, cellular, and molecular regulation of orthodontic tooth movement: 100 years after Carl Sandstedt. *Eur J Orthod.* 2006;28(3):221-40.
4. Burstone CJ. The biomechanics of tooth movement. In: Graber TM, Vanarsdall RL, Vig KWL, editors. *Orthodontics: Current Principles and Techniques.* 5th ed. St Louis: Elsevier; 2012. p. 195-243.
5. Kusy RP, Whitley JQ. Friction between different wire-bracket configurations and materials. *Semin Orthod.* 1997;3(3):166-77.
6. Kusy RP, Whitley JQ. Resistance to sliding of orthodontic appliances in the dry and wet states: influence of archwire alloy, interbracket distance, and bracket engagement. *J Biomech.* 2000;33(5):539-47.
7. Thorstenson GA, Kusy RP. Resistance to sliding of self-ligating brackets versus conventional stainless steel twin brackets with second-order angulation in the dry and wet states. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2001;120(4):361-70.
8. Bhushan B. *Introduction to Tribology.* 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons; 2013.
9. Bowden FP, Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids.* Oxford: Oxford University Press; 2001.
10. Kapur R, Sinha PK, Nanda RS. Frictional resistance in orthodontic brackets with repeated use. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1999;116(4):400-4.

11. Articolo LC, Kusy RP. Influence of angulation on the resistance to sliding in fixed appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1999;115(1):39-51.

12. Drescher D, Bourauel C, Schumacher HA. Frictional forces between bracket and arch wire. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1989;96(5):397-404.

13. Iwasaki LR, Beatty MW, Randall CJ, Nickel JC. Clinical ligation forces and intraoral friction during sliding mechanics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2003;123(4):408-15.

14. Kusy RP. Orthodontic biomaterials: from the past to the present. *Angle Orthod.* 2002;72(6):501-12.

15. Keith O, Jones SP, Davies EH. The influence of bracket material, ligation force and lubrication on frictional resistance. *Eur J Orthod.* 1993;15(6):483-90.

16. Hain M, Dhopatkar A, Rock P. The effect of ligation method on friction in sliding mechanics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2003;123(4):416-22.

17. Downing A, McCabe JF, Gordon PH. The effect of artificial saliva on the frictional forces between orthodontic brackets and archwires. *Br J Orthod.* 1995;22(1):41-6.