



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

BETHIZA CROZARIOL CAMPOS

**BRAQUETES CERÂMICOS IMPRESSOS EM 3D: ensaio mecânico
de coeficiente de atrito**

2022

BETHIZA CROZARIOL CAMPOS

**BRAQUETES CERÂMICOS IMPRESSOS EM 3D: ensaio mecânico de
coeficiente de atrito**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE, pelo Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA E TECNOLOGIA APLICADA À ODONTOLOGIA.

Área: Inovação tecnológica multidisciplinar com ênfase em odontologia. Linha de pesquisa: Inovação tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Galera da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Sergio Elias Neves Cury

São José dos Campos

2022

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2022]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Campos, Bethiza Crozariol

Braquetes cerâmicos impressos em 3D: ensaio mecânico de coeficiente de atrito. / Bethiza Crozariol Campos. - São José dos Campos : [s.n.], 2022. 41 f. : il.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Aplicada à Odontologia - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2022.

Orientador: Eduardo Galera Da Silva

Coorientador: Sergio Elias Neves Cury

1. Braquetes ortodônticos. 2. Fricção. 3. Desenho assistido por computador. 4. Impressão tridimensional. 5. Cerâmica. I. Silva, Eduardo Galera Da, orient. II. Cury, Sergio Elias Neves, coorient. III. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - Unesp. V. Universidade Estadual Paulista (Unesp). VI. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Galera da Silva (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Carolina Machado Martinelli Lobbo

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

São José dos Campos

Manoela Moraes Figueiredo

São Leopoldo Mandic

Campinas - SP

São José dos Campos, 24 de agosto de 2022.

DEDICATÓRIA

*Ao meu querido marido André e aos meus
filhos amados Letícia e Lucca.*

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo meu marido André por todo amor, compressão e suporte ao longo dessa jornada, pois não mediu esforços para que eu realizasse mais esse sonho.

Meus filhos Letícia e Lucca que compreenderam a minha ausência e em alguns momentos minha falta de paciência, me acolheram e me deram todo amor e carinho nos momentos mais difíceis.

Meus pais, Roseli e Emanuel por serem exemplo de dedicação e pelo suporte durante todos esses anos.

Meus sogros, D. Neide e Sr. Coutinho por acreditarem e mim e me ajudar no cuidado com as crianças.

Ao professor Celestino Nobrega por me presentear com o tema desse trabalho tão inovador e importante.

Ao meu orientador professor Eduardo Galera que me ajudou muito durante esse processo.

Ao meu coorientador professor Sérgio Cury pela experiência e ajuda durante todo o trabalho.

Ao ICT-Unesp e a todos professores do mestrado profissional pela oportunidade de participar desse programa.

A professora Carolina Martinelli pela contribuição importante que deu ao meu trabalho.

A Thaís, responsável pelo laboratório de materiais dentário junto com os colegas que também frequentam o laboratório.

A Ortogeo que me acolheu e me permitiu fazer o estágio na área. Aos professores e amigos que fazem parte da escola Liliam,

Dani lo, Paulo, Rog rio, Kozel que me receberam e me ajudaram durante todo programa.

A amiga Lar ssa que me ajudou, compartilhou e dividiu comigo muito desse trabalho.

M nhas cunhadas Carmem e G sela por revisarem meu trabalho.

Meu pr mo Fernando e ao cunhado Bill por me auxiliarem com o ingl s.

Enfim a todos envolvidos direta e indiretamente nessa conquista o meu mais sincero obrigada.

"Todas as coisas são possíveis àqueles que creem."

S. Marcos, 11:23

RESUMO

Campos B. Braquetes cerâmicos impressos em 3D: ensaio mecânico de coeficiente de atrito [dissertação]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2022.

Objetivo: Avaliar e comparar o atrito entre braquetes ortodônticos (convencional e impressos) e fio de aço. A hipótese nula (H_0) é que a média de forças de atrito sejam iguais entre os grupos. **Material e Método:** O ensaio mecânico foi realizado com 3 grupos de braquetes distintos. Sendo eles: Grupo de braquetes convencional como referência o ClarityTM Advanced (3M Unitek), comparado com dois grupos de braquetes impressos em impressora 3D o Lightforce White (Lightforce Orthodontics) e Lightforce Translucent (Lightforce Orthodontics). As amostras de cada grupo possuem um $N=10$; os braquetes usados são referentes ao dente 23 (U23) com slot 0.022 e prescrição MBT. O fio ortodôntico foi o de aço inoxidável (CrNi) com calibre de 0.019"x 0.025". O conjunto braquete/fio, unido por ligadura elastomérica, foi colado ao dispositivo de teste, desenvolvido em CAD e impresso em 3D com resina sensível a luz UV, totalizando 30 amostras. Cada amostra foi adaptada a máquina universal de ensaio (EMIC DL – 2000) com deslocamento de 2,0mm e velocidade de 1,0mm/min, para mensurar o atrito causado pelo desliz. A força (N) representada pelo pico de cada amostra e, então, realizados a média e o desvio padrão. A comparação foi realizada em nível de significância $\alpha = 0,05$. A análise de variância ANOVA foi usada para determinar se houve diferenças entre as amostras e o teste post-hoc Tukey. **Resultados:** $\mu=0,121N$ para o Clarity, $\mu=0,173N$ para o Lightforce White e $\mu=0,189N$ para o Lightforce Translucent. **Conclusão:** Os braquetes impressos não apresentaram diferença significativa entre eles, porém houve uma pequena diferença para os braquetes do grupo controle que apresentaram uma resistência menor ao desliz do arco.

Palavras-chave: braquetes ortodônticos; fricção; cerâmica; desenho assistido por computador; impressão tridimensional.

ABSTRACT

Campos B. Ceramic brackets printed on 3D: mechanical essay on the friction coefficient [dissertation]. São José dos Campos (SP): São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2022.

Purpose: To evaluate and compare the friction between orthodontic brackets (conventional and imprinted) and steel wire. The null hypothesis (H_0) is that the average friction forces between the groups are equal. **Material and method:** The mechanical test was performed with 3 different groups of brackets. These are: Conventional bracket group as reference, Clarity™ Advanced (3M Unitek), compared to two groups of 3D printer printed brackets, Lightforce White (Lightforce Orthodontics) and Lightforce Translucent (Lightforce Orthodontics). The samples from each group have an $N=10$, and the brackets used are for tooth 23 (U23) with slot 0.022 and MBT prescription. The orthodontic wire was stainless steel (CrNi) with a thickness of 0.019" x 0.025". The bracket/wire set, connected by an elastic ligature, was bonded to the test fixture, which was designed in CAD and 3D printed with UV light-sensitive resin. A total of 30 specimens were fabricated. Each specimen was mounted on a universal testing machine (EMIC DL - 2000) with a displacement of 2.0 mm and a speed of 1.0 mm/min to measure the friction caused by the slide. The force (N) represented by the peak value of each sample, mean and standard deviation were calculated. The comparison was performed with a significance level of $\alpha = 0.05$. The ANOVA analysis of variance was used to determine if there were differences between samples, and the Tukey test was performed post hoc. **Results:** $\mu=0.121N$ for Clarity, $\mu=0.173N$ for Lightforce White, and $\mu=0.189N$ for Lightforce Translucent. **Conclusion:** The printed brackets did not show significant differences. However, there was a small difference in the brackets of the control group, which showed less resistance to arch wire slippage.

Keywords: orthodontic brackets; friction; ceramics; computer-aided design; printing, three-dimensional.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3 PROPOSIÇÃO	21
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1 Materiais:.....	22
4.1.1Preparação do corpo de prova.....	24
4.1.2 O Teste	27
5 RESULTADO	28
5.1 Análise estatística	29
6 DISCUSSÃO	32
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

O século XXI passou por processos de modernização das máquinas, equipamentos em uma velocidade muito maior que nos séculos anteriores, principalmente nas últimas duas décadas a evolução dos processos de digitalização, tanto as ferramentas de imagens, *softwares* de análise e diagnóstico, arquivamento de dados, quanto de impressão de materiais sofreram evoluções exponenciais e a ortodontia tem acompanhado essa evolução (Tarraf, Ali, 2018).

Em meados da década de 70, Laurence Andrews desenvolveu braquetes com desenho que possuíam as características ideais para cada movimento dentário, descobertas a partir do estudo realizado por ele em 1962. A partir deste momento a técnica Edgewise evoluiu para o Straight Wire (SW) (Andrews, 1979). O Edgewise exigia muita habilidade manual e demanda de tempo dos profissionais, para formar arcos ideais do início até a finalização do tratamento. O sistema SW revolucionou, pois os braquetes passaram a ter prescrições e assim, diminuir a confecção das dobras em arco. Desde então se deu início a uma busca por prescrições que fossem mais efetivas. Andrews, como precursor da técnica, determinou onze prescrições diferentes, cada uma indicada para determinado perfil de paciente e movimentação ortodôntica planejada. Muitos autores seguiram os passos de Andrews e desenvolveram prescrições sempre com o mesmo objetivo, melhorar a finalização ortodôntica, reduzir tempo de tratamento e aumentar o conforto do profissional e paciente (Brito Júnior, Ursi, 2006).

A dificuldade de se desenvolver uma prescrição única para todos os indivíduos está justamente na diferença existente entre eles, como Ronald Roth concluiu em 1987, os dentes possuem superfícies vestibulares diferentes (Roth*, 1987 citado por Brito Júnior, Ursi, 2006). Em média conseguem-se bons resultados a partir da escolha de uma prescrição, porém, na grande maioria das vezes, são necessárias dobras de finalização. Outro fator que dificulta a técnica SW é a necessidade do posicionamento correto do acessório ao dente (Mota Júnior et al., 2018).

Com a evolução dos scanners intraorais e a tecnologia da impressão de diversos tipos de materiais em impressoras 3D, o CAD/CAM descrito como projetados por computador (Computer Aided Design) e fresados por uma máquina assistida por

*Roth RH. The straight wire appliance 17 years later. J Clin Orthod. 1987;21(9):632-42

computador (Computer Aided Machined) já é possível planejar, posicionar e customizar os braquetes, imprimir suportes e guia para colagem indireta dos acessórios nos dentes (Ghafoor, 2018; Kim et al., 2018).

Essa nova tecnologia, associada à demanda dos pacientes por aparelhos mais estéticos, corroborou o desenvolvimento de braquetes com a técnica do CAD/CAM e impressos em 3D.

O fluxo de trabalho para a confecção e aquisição dos braquetes assemelha-se ao fluxo de trabalho dos alinhadores ortodônticos. Inicialmente é realizado o escaneamento das arcadas do paciente que gera um arquivo em STL. Esse arquivo é levado para um software de planejamento digital, onde o ortodontista define o setup final da posição ideal dos dentes para o paciente e, então, a partir daí são definidos os parâmetros de torque, in-outs, TIPs e rotações dos braquetes e o melhor local para os posicionar nos dentes. A colagem dos acessórios é realizada pelo método indireto, onde se utiliza um suporte confeccionado de material flexível para adaptação e remoção pelo ortodontista (Krey et al., 2016; Panayi, Tsolakis, 2021; Yang et al., 2019).

A tecnologia da manufatura aditiva (MA) pode ser definida como o processo de união de materiais para fazer um objeto a partir de modelos 3D. A terminologia MA é classificada de acordo com o tipo de material e o tipo de deposição utilizada no processo. Nesse estudo os braquetes utilizados foram confeccionados com material cerâmico baseado em litografia (LCM), um tipo de MA indireta. Esse processo aumenta o poder de flexibilidade do material e permite maior detalhamento das peças (Scheithauer et al., 2018).

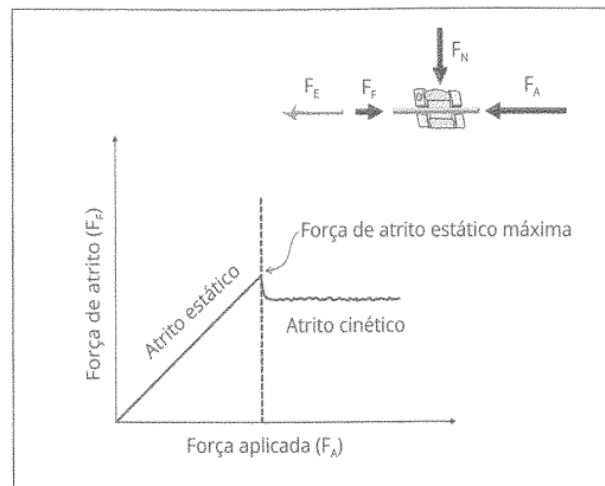
A cerâmica utilizada foi a alumina (Al_2O_3) policristalina, que possui como características a cor do material, dureza elevada, alta resistência a temperatura e à corrosão, são isolantes elétricos, biocompatíveis e resistentes a furos. Além disso, é o material de escolha para grande parte dos braquetes convencionais fabricados em cerâmica (Galante et al., 2019; Scheithauer et al., 2018).

Para garantir a eficácia desse novo método de manufatura de acessórios ortodônticos, muitos estudos são necessários, dentre eles o de coeficiente de atrito. As forças de atrito diferem-se em atrito estático, caracterizado pela força necessária para iniciar o movimento, e cinético, definido como a força que resiste ao movimento durante o deslizamento de um corpo sobre o outro. O atrito está presente em todo

sistema de forças ortodônticas, quando o fio desliza através da ranhura horizontal do braquete e no método de amarração do fio ao braquete, sendo que a maior força está associada ao início do movimento dentário e esta força pode variar como, por exemplo, durante o movimento de retração de canino. O atrito pode ser favorável ou desfavorável, o importante é conhecê-lo para evitar principalmente efeitos colaterais indesejados (Braun et al., 1999; Mendes, Rossouw, 2003; Reznikov et al., 2010; Rossouw, 2003).

A força de atrito (F_F) aumenta na mesma proporção que a força aplicada (F_A) porém em sentido oposto, isso ocorre até um determinado ponto chamado de atrito estático máximo, se o aumento da força aplicada for superior a força de atrito máxima, o corpo iniciará o movimento a partir do início do movimento, a força diminui ligeiramente (atrito cinético). Porém o movimento dentário ocorre de forma intermitente, isto é, não se mantém contínuo, sendo o atrito estático a variável relevante para ortodontia (Burnstone, 2018) (Figura 1).

Figura 1 - Gráfico da força aplicada (F_A) versus força de atrito (F_F)



Fonte: Burnstone, 2018.

A mecânica de deslize pode estar presente durante o fechamento de espaço e é influenciada diretamente pelas características da composição dos materiais de

braquetes, fios e métodos de amarração, quanto maior o grau de rugosidade desses materiais, maior o coeficiente de atrito (Azevedo et al., 2013; Mendes et al., 2014). Durante a mecânica de deslize do dente ao longo do arco ortodôntico, quanto maior a resistência ao deslocamento, mais força será necessária para a sua movimentação. Reduzir o atrito facilita o fechamento de diastemas em mecânica com extração (Cacciafesta et al., 2003; Pacheco et al., 2011).

Frente a importância de se conhecer o atrito na ortodontia e considerando a inovação desses novos modelos de manufatura, este trabalho propõe avaliar o atrito entre os braquetes impressos e um único tipo de fio, comparando-os com a marca de braquete convencional de referência.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A evolução dos aparelhos ortodônticos, juntamente com a grande variação entre as prescrições, até então existentes, foi tema do trabalho de Brito Júnior e Ursi (2006) que relataram em ordem cronológica a busca de diversos autores por uma prescrição ideal ao longo da evolução dos anos. Cada autor, descrito pelo artigo, justifica a variação de movimentação, angulação final do dente na arcada, melhor controle de torque e assim busca a prescrição que melhor cabe para determinada situação. Foram um total de 13 prescrições descritas dentre elas as mais conhecidas como Andrews, Tip Edge, Roth, MBT, Capellozza e Damon. Neste mesmo artigo, há o relato de um grupo de autores que utilizou a tecnologia dos scanners para copiar modelos de gesso, para planejar virtualmente as angulações e torques para um posicionamento final ideal, a partir dos resultados encontrados, o grupo chegou a uma média de valores e nomearam de prescrição Orthos.

No entanto apenas uma prescrição baseada em uma média de valores, não seria 100% eficaz, obrigando o ortodontista realizar dobras de finalização em seus pacientes, isto em razão da imensa variação existente na superfície dental entre indivíduos. Tendo em mãos uma gama de prescrições diferentes para aprimorar a qualidade e o tempo dos tratamentos ortodônticos, a necessidade de confeccionar dobras diminuiu muito, porém segundo Creekmore, Kunik (1993), após estudos realizados, concluíram que os resultados esperados dos aparelhos pré-ajustados não alcançados, são devido a uma falha na precisão de colagem dos acessórios, falha humana, variação da anatomia dentária. O autor sugere a individualização das prescrições e guias para colagem indireta como uma boa opção para que os aparelhos alcancem uma maior eficiência.

O emprego da técnica CAD com impressão digital dos acessórios até então era possível apenas em braquetes metálicos, para adaptação na região lingual dos dentes, o sistema insígnia usava a engenharia reversa em braquetes para adaptar a prescrição Roth, e melhor adaptação da base do braquete na superfície do dente, porém, a técnica conhecida como lingual, também demanda coordenações e dobras de finalização do tratamento nos arcos ortodônticos, voltando a limitação dos sistemas até então utilizados (Ghafoor, 2018; Weber et al., 2013).

O sistema CAD/CAM passou a ser amplamente utilizado em pesquisas na ortodontia, no auxílio do diagnóstico, planejamento ortodôntico, confecção de alinhadores transparentes, customização de aparelhos linguais entre outros. Brown et al. (2015) avaliaram se existia diferença em termos de qualidade, tempo, e número de consultas entre os tratamentos ortodônticos realizados entre 3 grupos de pacientes, sendo o primeiro grupo de pacientes com braquetes autoligados colados diretamente; segundo grupo, braquetes autoligados colados indiretamente, e o terceiro grupo com braquetes autoligados individualizados por CAD/CAM e colados indiretamente. Seus resultados mostraram que não houve diferença entre a qualidade do tratamento final, porém houve diferença entre o tempo de tratamento e número de consultas que foi significativamente menor no grupo individualizado. Kim et al. (2018), realizaram um estudo clínico semelhante ao anterior, onde avaliaram 3 grupos de pacientes com aproximadamente 30 participantes em cada grupo, e compararam a diferença entre o tempo de tratamento e o número de consultas. No grupo 1 foi realizada colagem direta, no grupo 2, colagem indireta, no grupo 3, o posicionamento dos braquetes foi realizado no software e realizada a impressão de um jig para a colagem indireta. Os autores concluíram que houve um menor tempo de tratamento e número de consultas no grupo 3 em relação aos outros grupos.

Diante da necessidade de braquetes estéticos e com o uso da tecnologia CAD/CAM para impressão de braquetes, Krey et al. (2016) desenvolveram em um conjunto de braquetes com o slot tipo Edgewise (sem prescrição) e colocaram as prescrições ortodônticas (tip, torque e in-out) na base dos acessórios customizados para o paciente tratado no estudo; os braquetes foram impressos em policarbonato e instalados pelo método de colagem indireta, os autores relataram alguns problemas como irritação da mucosas, devido ao formato afiado, as bordas dos braquetes resultantes do processo de impressão 3D, aletas que fraturaram em alguns braquetes, no entanto os autores conseguiram realizar o tratamento até o final e concluíram que a tecnologia de impressão 3D para braquetes é uma possibilidade viável, mas que requer mais estudos e melhorias no desenvolvimento dos projetos e qualidade de materiais para impressão.

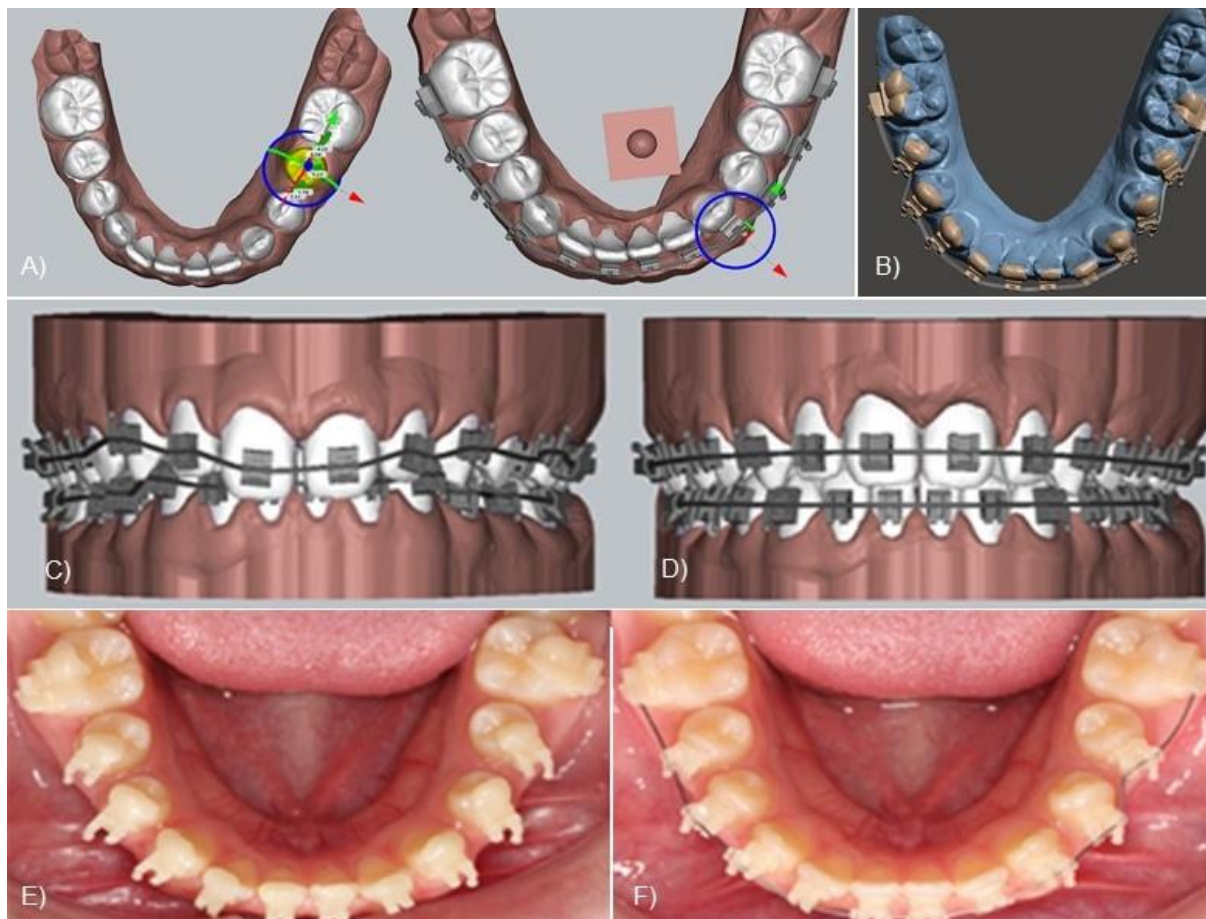
Braquetes de policarbonato apresentam problemas como menor resistência ao desgaste, dureza reduzida, maior absorção de fluido oral que leva a alteração de cor e liberação de odor indesejável (Choi et al., 2014) Materiais cerâmicos são

amplamente utilizados na odontologia, em coroas, próteses em geral, por possuírem características semelhantes aos dentes naturais, resistência à compressão, condutividade térmica, radiopacidade e estabilidade de cor (Galante et al., 2019).

Yang et al. (2019) fizeram a impressão de braquetes estéticos em dissilicato de lítio IPS e.Max, material muito utilizado em restaurações estéticas indiretas; submeteram esses braquetes em um ensaio mecânico $n=10$ para comparar seu coeficiente de atrito com braquetes de marcas comercializadas. Para o estudo foram testados os braquetes Clarity™ (3M Unitek), Crystalline VII de alumina policristalina, Inspire ICE de alumina monocristalina e o autoligado metálico Damon Q. Concluíram que, apesar dos braquetes impressos terem apresentado um coeficiente de atrito mais alto dos outros grupos, o que requer uma força maior para o deslizamento do fio pelo braquete, essa força não representa um prejuízo ou risco biológico para o tratamento, portanto possibilitam seu uso clínico.

Relatos de caso com uso de braquetes cerâmicos impressos estão começando a aparecer, como o dos autores Panayi, Tsolakis (2021) que usaram o método de CAD/CAM para realizar o tratamento ortodôntico de um adolescente sexo masculino de 13 anos de idade. O escaneamento das arcadas do paciente foi importado para o software de planejamento digital, para individualização dos braquetes, a partir de arquivos disponíveis na biblioteca do software; a impressão foi realizada pela tecnologia SLA, utilizando a resina cerâmica de impressão 3D (Formlab), utilizada na confecção de coroas protéticas. A colagem dos acessórios foi realizada de maneira indireta utilizando guias de colagem. Os autores concluíram que o método funciona, porém ainda requer mais estudos e melhoria nos materiais de impressão dos braquetes (Figura 2).

Figura 2 - Planejamento, visualização do setup, colagem dos braquetes impressos em 3D



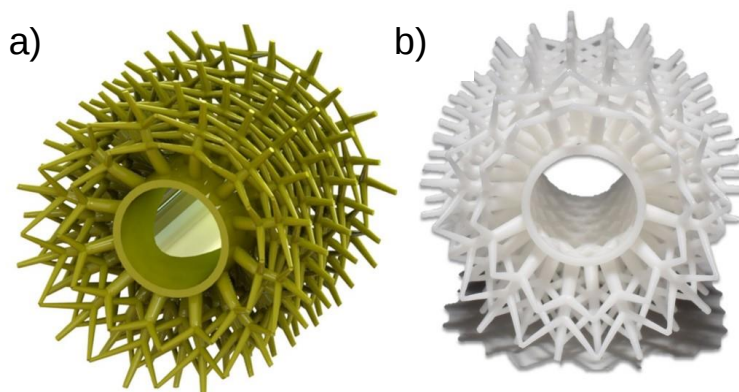
Legenda: a) Planejamento do posicionamento dos braquetes; b) Desenvolvimento dos guias para colagem dos braquetes; c) Modelo da maloclusão na fase inicial do tratamento; d) Setup do modelo no arco final do tratamento; e) Colagem direta dos braquetes impressos usando os guias; f) Remoção dos guias de colagem e colocação do arco ortodôntico.

Fonte: Adaptado de Panayi, Tsolakis (2021)

O uso de materiais mais compatíveis com a mecânica ortodôntica, vem sendo desenvolvido, o método de impressão a partir de litografia e impressão de alumina para confecção de diversas utilizações foi estudado por Scheithauer et al. (2018) o processo de impressão dos braquetes é baseado em manufatura aditiva, onde os objetos obtidos em CAD, são construídos camada por camada, usando tecnologia de impressão em LCM (cerâmica baseada em litografia) onde ocorre a exposição de luz UV para curar primeira camada de matéria que consiste uma suspensão fotossensível (composta de monômero, fotoiniciadores e partículas de cerâmicas dispersas homogêneas), esta camada fica presa na base da plataforma, todas as camadas

subsequentes são irradiadas do fundo para baixo, a suspensão não curada volta para o reservatório e pode ser usada para produzir a próxima camada. Após a impressão é necessária a limpeza com fluido de limpeza da Lithos, combinado com ar comprimido, então a peça passa pelo processo de sinterização, neste trabalho os autores concluíram que esse processo permite sim o desenvolvimento de peças com alto grau de resistência e resolução, porém, o processo ainda requer CADs que sejam fáceis para modificação dos projetos e ainda existe um custo elevado para a produção desse tipo de material (figura 3). Segundo Shannon e Groth (2021) a LigthForce Orthodontics foi a primeira empresa a utilizar a tecnologia de impressão da LCM (CeraFab 7500, suspensão de alumina Lithalox 350) para fabricação dos braquetes.

Figura 3 – Imagem do objeto planejado em CAD e impresso em cerâmica



Legenda: a) objeto em CAD b) objeto impresso em 3D em cerâmica.
Fonte: Adaptado do trabalho de Scheithauer et al. (2018)

A alumina (Al_2O_3) policristalina por injeção de molde é o material de escolha para os braquetes cerâmicos comercializados; os braquetes avaliados neste estudo são impressos com uma suspensão de alumina (Al_2O_3) policristalina. Estudos sobre atrito são muito comuns na ortodontia para caracterizar desempenho de diferentes braquetes. O atrito é um desafio clínico, especialmente na mecânica de deslize, onde é desejado que o atrito tenha um valor que permita que forças leves sejam capazes

de realizar os movimentos desejados, sem prejuízo biológico para as raízes dos dentes e manter o controle de torque para fornecer resultados ortodônticos satisfatórios. (Rossouw, 2003)

Tageldin et al. (2016) realizaram uma revisão sistemática de experimentos *in vitro* que avaliaram a resistência ao deslizamento na ortodontia. Segundo os autores dentre os experimentos avaliados, nenhum estudo *in vitro* conseguiu ainda reproduzir todas as variáveis presentes em condições clínicas, porém quanto mais reprodutíveis e controladas são as metodologias executadas, estes experimentos podem sim apresentar um grau de confiança na representação de determinada condição clínica. Observaram, ainda, que a resistência ao deslizamento é um evento multifatorial que precisa ser mais bem conhecido.

A grande quantidade de variáveis da resistência ao deslize foi apontada por Fathimani et al. (2015) que desenvolveram um dispositivo que pudesse testar as variáveis e, assim, minimizar as diferenças encontradas entre os estudos observados por eles. Neste modelo, uma das variáveis testadas, foi a força necessária para puxar o fio ao longo do braquete unido por ligadura elástica.

Lima et al. (2010) realizaram um ensaio mecânico para avaliar o coeficiente de atrito entre 8 grupos sendo, 4 grupos com braquetes de aço e 4 grupos com braquetes de policarbonato, e 4 amostras por grupo (n=4). Os grupos foram subdivididos em 3 tipos de amarração: Amarrilhado com Mathieu; amarrilhado com Stainer plier, com ligadura elastomérica MorelliTM, e com ligadura elastomérica TP OrthodonticsTM. Para o teste utilizaram uma máquina universal para tracionar o pedaço de arco de aço 0.019"x 0.025" a uma velocidade de 0,5mm/min deslocando 8mm. O teste realizado foi ANOVA e Tukey para comparação múltipla das diferenças entre os grupos.

Williams e Khalaf (2013) testaram 4 diferentes sistemas de braquetes com slot 0.022" de dente pré-molar. Os 4 grupos foram divididos em: Autoligado cerâmico MystiqueR com clip passivo; cerâmico ClarityTM com slot metálico; braquete cerâmico convencional, e metálico convencional, ambos com ligadura elastomérica. As amostras possuíam o n=5. Foram avaliadas as seguintes variantes: coeficiente de atrito entre todos os sistemas de braquetes e arcos de aço 0.018" x 0.025" angulados em 7°. E entre os arcos de aço inoxidável 0,014" e 0.018" x 0.025" angulados em 0° e 7°. Para o teste, utilizaram um suporte desenhado para os braquetes e posicionaram

os arcos sem torque em uma base inferior e colocaram uma base superior. Os suportes foram adaptados em uma máquina de testes universal. Os testes de atrito foram realizados 50 vezes com cada amostra nas angulações de 0° e 7° a uma velocidade de 0,5mm/min. Os níveis de força foram registrados em um gráfico de deslocamento de força, e usados para comparar a influência de cada sistema de braquete na resistência ao deslizamento. O teste de variância ANOVA foi aplicado e pos-hoc Tukey e concluíram que os braquetes cerâmicos apresentam maior resistência ao deslizar o braquete com o fio quando comparado aos braquetes metálicos. A resistência também aumenta quando a angulação do braquete aumenta.

3 PROPOSIÇÃO

O objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar o atrito existente entre três sistemas compostos por fio de aço e braquetes cerâmicos confeccionados por diferentes processos de manufatura.

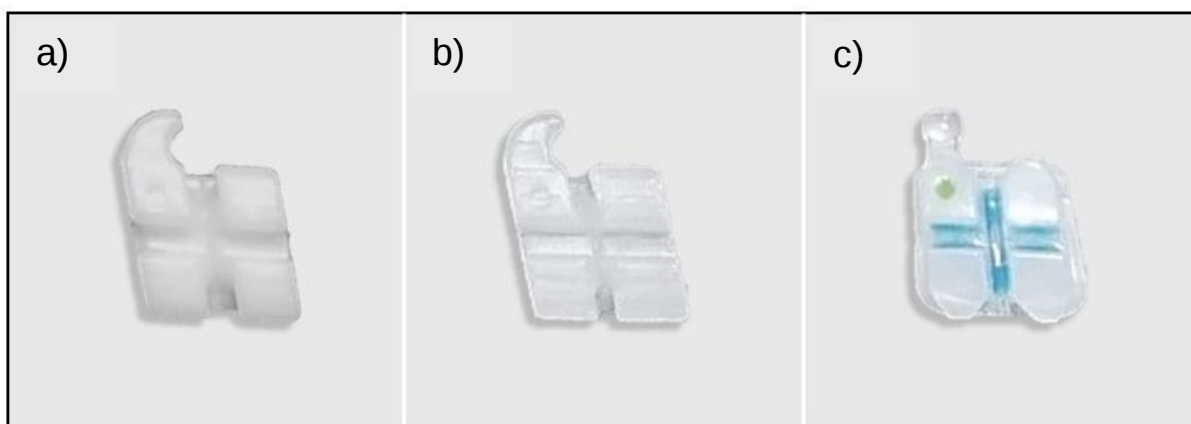
4 MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio mecânico descrito abaixo, como foi realizado adaptado das metodologias dos trabalhos de Lima (2010), Williams e Khalaf (2013).

4.1 Materiais:

Para o teste foi utilizado um total de 30 braquetes divididos em 3 grupos com 10 unidades de braquetes, sendo todos eles referentes ao Canino superior direito com parâmetros de torque, in-out e tips da prescrição MBT (McLaughlin, Bennett e Trevisi) e com tamanho de Slot de 0,022 pol. O primeiro grupo formado pelos braquetes impressos Lightforce White (Lightforce Orthodontics – MA - EUA) (LFW). O segundo grupo também por braquetes impressos de segunda geração Lightforce Translucent (Lightforce Orthodontics – MA - EUA) (LFT). Os braquetes LFW apresentam cor A1 da escala VITTA Classical, os braquetes LFT cor B1 na escala VITTA Classical, as cores foram definidas baseadas na leitura do equipamento easys shade (Wilcos do Brasil Indústria e Comércio LTDA Petrópolis – Brasil), grupo 3 como controle por braquetes cerâmicos convencionais da marca Clarity™ Advanced 3M (CL) este ultimo apresentou a cor B1 na escala VITTA Classical (Figura 4).

Figura 4 - Braquetes usados no teste

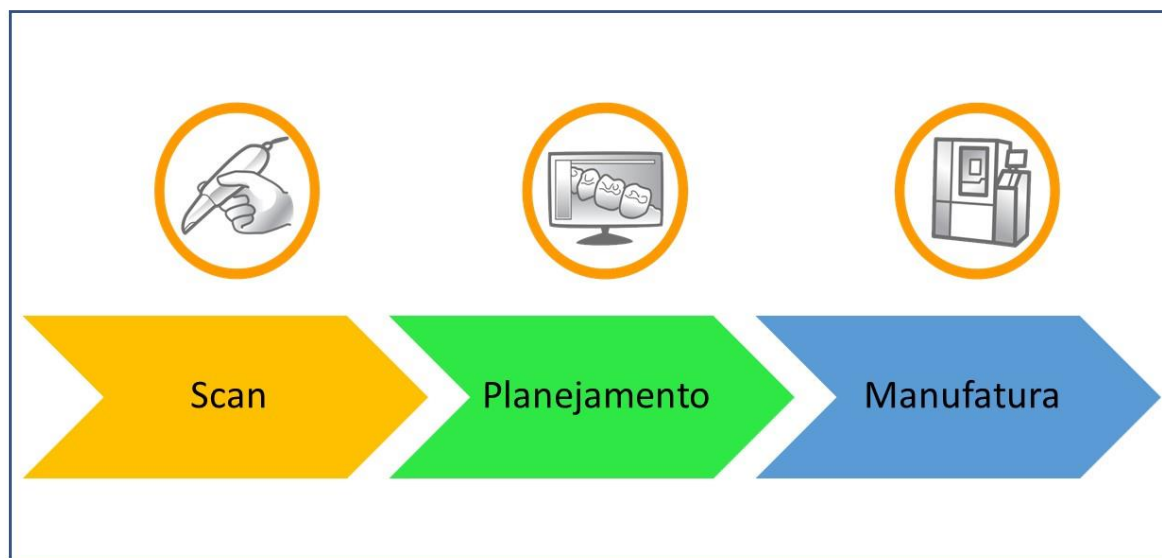


Legenda: a) Braquetes impressos Lightforce White (LFW); b) Braquetes impressos Lightforce Translucent (LFT); c) Braquetes cerâmicos convencionais da marca Clarity™ Advanced 3M (CL).
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este ensaio *in vitro* os braquetes da LFO System utilizados não passaram pelo processo de planejamento digital (Figura 5), pois foram utilizados os mesmos parâmetros dos braquetes do grupo controle.

Foi utilizado apenas um tipo de fio ortodôntico de aço inoxidável geometria retangular 0.019"x 0.025" (0,48mm x 0,63mm) da marca, Dentsply Sirona (Dentsply GAC International – NY - EUA), considerado adequado para o fechamento do espaço durante a mecânica de deslize, porque oferece uma boa proporção entre atrito e controle de torque anterior (Moore et al., 2004). Como método de ligação do fio com o braquete, foram utilizadas ligaduras elastoméricas medindo 1,2 mm de diâmetro (Morelli®, Sorocaba - Brasil). Para união do braquete no dispositivo de teste utilizou-se adesivo Loctite Super Bonder Power Flex Gel Control (Henkel Ltda). Os dispositivos de testes obtidos por arquivo STL e impressos pela impressora digital 3D WD3 Print – LCD - Impressora 3D baseada em SLA. E para o ensaio mecânico foi usado a EMIC DL- máquina de precisão 2000® (EMIC, ICT - Unesp, São José dos Campos - Brasil).

Figura 5 - Fluxo digital para obtenção de braquetes impresso

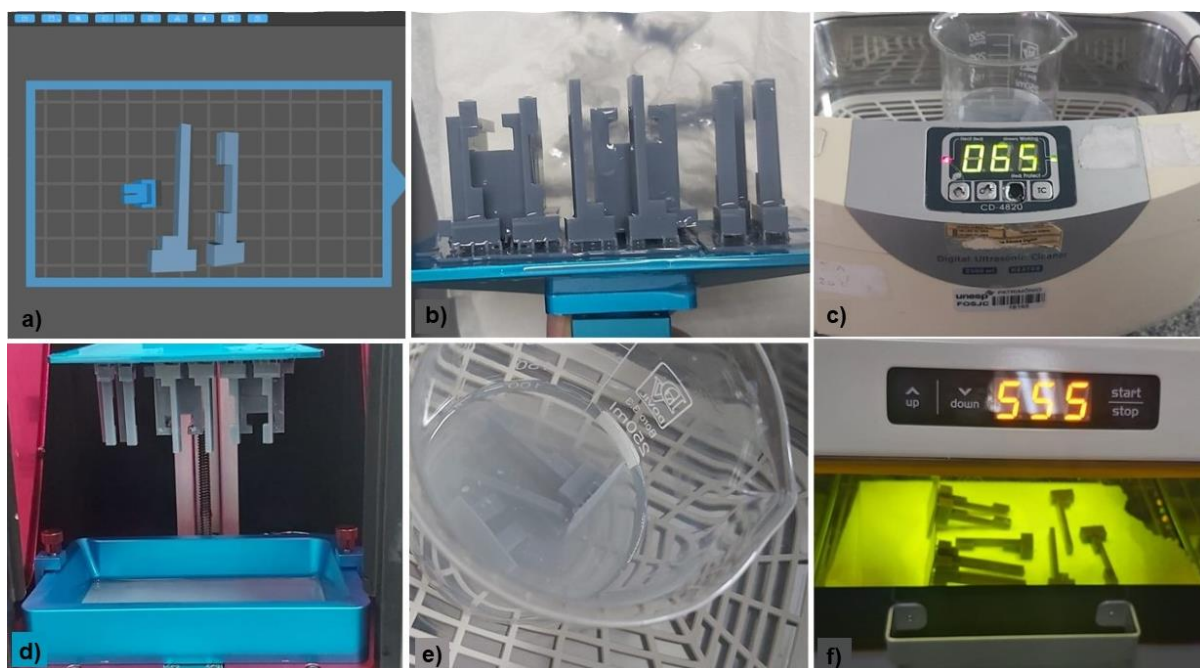


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.1 Preparação dos corpos de prova

Os dispositivos de teste foram cedidos pela empresa Lightforce Orthodontics em formato stl. Trata-se de 3 peças, sendo o dispositivo superior com formato em T de aproximadamente 5cm, usado como base para colagem do conjunto braquete fio e ligadura elástica; o dispositivo inferior com 5cm, no formato para se adaptar em contraposição com dispositivo superior, através da ranhura de 3,5cm localizada no seu centro, tendo entre eles, o conjunto braquete fio e ligadura, a última peça é o posicionador para a colagem padronizada dos braquetes com o fio. Para adaptação e edição das peças para impressão, foi usado o Rhinoceros 3D (Mcneel) um software de modelagem tridimensional (CAD – Computer Aided Design) e o Chitubox um *software* fatiador que prepara o modelo 3D para ser compreendido pela impressora baseada em SLA, onde as peças são impressas em camadas finas com uma resina líquida solidificada por luz ultravioleta, após construído, os dispositivos são levados para um banho em álcool isopropílico, para remoção do excesso de resina e, na sequência, colocados em uma câmara de UV para finalizar sua cura. (Figura 6)

Figura 6 - Obtenção do dispositivo para o teste

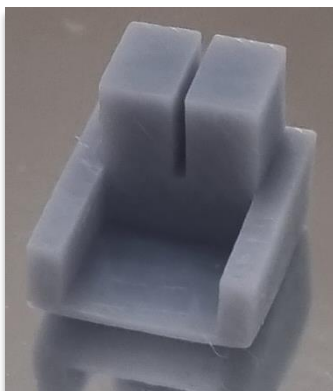


Legenda: a) dispositivos no Chitubox; b) e c) Impressão dos dispositivos; d) e e) lavagem das peças; f) Cura final da resina sob luz UV.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O fio reto CrNi .019" x.025" cortado no tamanho de 3,5 cm pelo alicate de corte distal 700 com widia (Quinelato), após a limpeza com lenço umedecido em álcool, foi fixado aos braquetes por uma ligadura elástica, em stick, incolor, com diâmetro de 1,2 mm (Morelli®, Sorocaba, Brasil).

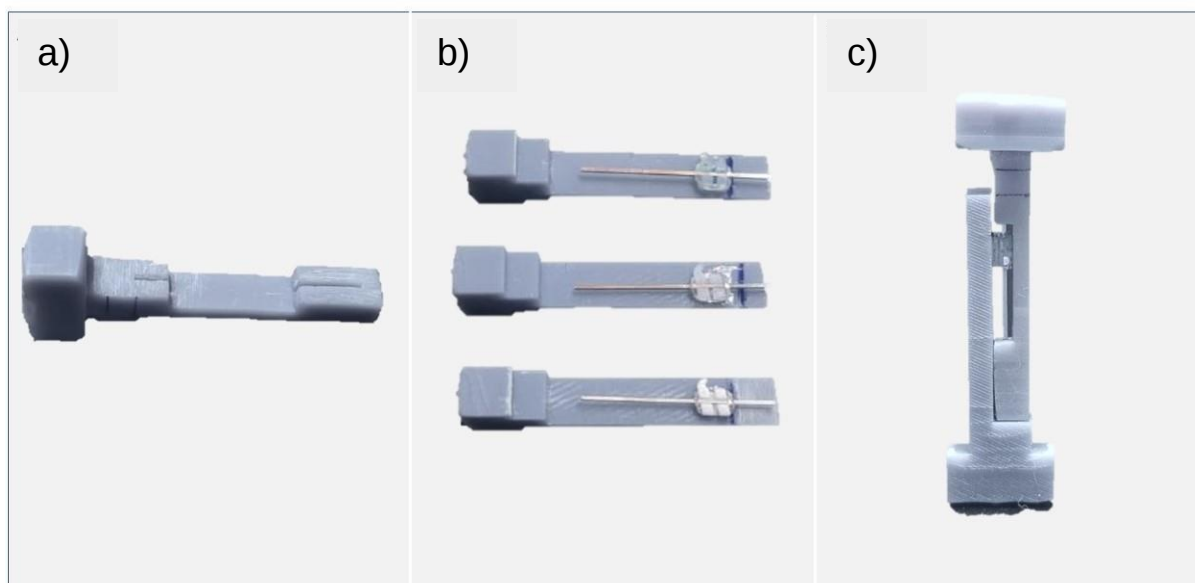
O conjunto foi levado para o dispositivo de teste de fricção inferior, onde foi fixado com adesivo super bonder de maneira que o conjunto ficasse centralizado no suporte. Para garantir a orientação correta, utilizou-se um posicionador (Figura 7). Aguardado pelo menos 15 minutos para secagem completa do adesivo para, então, acoplar o dispositivo superior no inferior. (Figura 8)

Figura 7 - Imagem do posicionador para colagem do conjunto braquete/fio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 - Preparação do corpo de prova para o teste



Legenda: a) dispositivo de teste superior; b) posicionamento do conjunto braquete/fio/ligadura no dispositivo de teste inferior; c) dispositivos combinados prontos para serem levados para máquina de teste.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dispositivos combinados foram levados para os adaptadores de teste da máquina EMIC e certificado de que o fio estava totalmente ligado e paralelo à direção do slot do braquete. (Figura 9)

Figura 9 - Adaptação do corpo de prova na máquina de ensaio universal



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 O teste:

Para o ensaio foi usado o software Tesc da máquina EMIC do laboratório de materiais dentários do ICT-Unesp, com o programa para o ensaio de tração. Após a adaptação do dispositivo na máquina EMIC, foi apertado o botão para zerar o deslocamento e a força da máquina, e então, foi apertado o botão para início da tração, esta tração deslocou o dispositivo superior pelo fio ortodôntico no sentido vertical a uma distância de 2,0mm e uma velocidade de 1,0mm/min. Após a conclusão do percurso de 2,0mm, o pico de força(N) necessária para o deslocamento foi registrado em uma tabela (tabela1), então removeu-se o dispositivo testado da EMIC e foi colocado outro dispositivo para um novo teste, sendo realizado o mesmo procedimento realizado pela amostra anterior, assim sucessivamente até finalizar as 30 amostras.

O valor de força de atrito (N) obtida no teste, foi medido em Newtons.

5 RESULTADOS

Com os 30 dispositivos prontos, estes foram levados para a máquina EMIC, onde obtivemos os resultados por amostra. Os valores apresentados na tabela abaixo, representam o valor de pico encontrado em cada teste (tabela1): Então foi realizado a média e o desvio padrão dos grupos. A média dos valores de cada grupo foi de: $\mu=0,173\text{N}$ para LFT, $\mu=0,189\text{N}$ para LFW e $\mu=0,121\text{N}$ para CL. Já o desvio padrão foi de 0,0258 para LFT, 0,0137 para LFW e 0,01792 para CL (tabela 2).

Tabela 1 - Valores em Newton do pico de cada amostra

AMOSTRAS	LFT	LFW	CL
1	0,15	0,22	0,10
2	0,20	0,19	0,13
3	0,19	0,18	0,10
4	0,20	0,17	0,15
5	0,15	0,18	0,11
6	0,21	0,19	0,13
7	0,18	0,19	0,10
8	0,15	0,19	0,13
9	0,16	0,18	0,14
10	0,14	0,20	0,12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Mostra a média, o desvio padrão, o coeficiente de variância, o menor valor encontrado e o maior valor encontrado entre as amostras

FATOR	N	MEDIA	DESVIO PADRÃO	COEF. VAR.	MIN.	MAX.
LFT	10	0,173	0,02584	14,94	0,14	0,21
LFW	10	0,189	0,0137	7,25	0,17	0,22
CL	10	0,121	0,01792	14,81	0,10	0,15

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1 Análise estatística

A análise de variância ANOVA (tabela 3), para verificar diferença entre os grupos, foi realizada considerando as seguintes hipóteses:

- a) Hipótese nula (H_0) = Todas as amostras são iguais.
- b) Hipótese alternativa (H_A) = Ao menos uma amostra é diferente.
- c) Nível de significância $\alpha = 0,05$.

Segundo os resultados obtidos a partir desta análise, existe diferença entre os grupos de braquetes impressos (LFT, LFW) quando comparados ao grupo de braquetes convencionais (CL). Os grupos de braquetes impressos apresentaram maior resistência ao atrito que o grupo de controle.

Tabela 3 - Análise ANOVA

SOURCE	DF	Adj SS	Adj MS	F-VALUE	P-VALUE
Factor	2	0,02528	0,1264	32,23	0,001*
Error	27	0,01059	0,000392		
Total	29	0,03587			

Legenda: P-Value <0,05*

Fonte: Elaborada pelo autor.

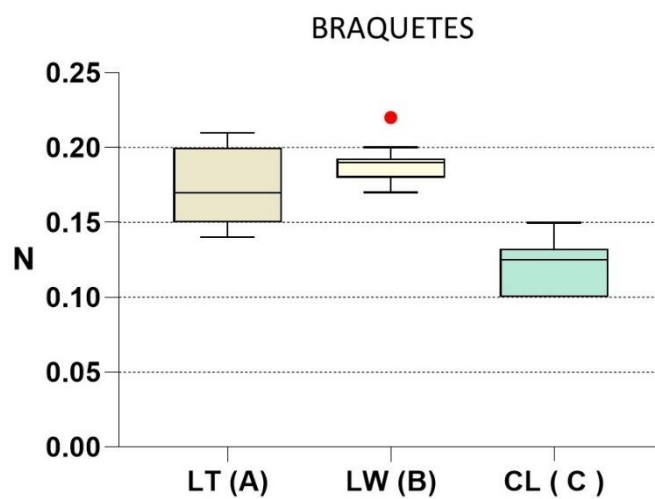
O resultado do teste Tukey, descrito na tabela abaixo (tabela4), identificou que as médias que compartilham o mesmo grupo não apresentam diferenças significativas. Sendo assim os grupos LFT e LFW não apresentam diferenças significativa entre eles, porém os dois grupos apresentam diferença com o grupo CL (figura 10).

Tabela 4 – Representa o resultado do teste Tukey

FATOR	N	MEDIA	GRUPO
LFT	10	0,173	A
LFW	10	0,189	A
CL	10	0,121	B

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – Representa através de gráfico a diferença estatística dos valores das amostras



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 DISCUSSÃO

Os resultados dos testes mostram que houve uma significância estatística, que representou diferença entre os resultados dos braquetes convencionais em relação aos braquetes impressos. Na mecânica de deslize existem muitas variáveis como a composição de fio e braquete, tamanho da ranhura (0.018 pol. ou 0.22 pol.), dimensões e formato do fio ortodôntico, método de ligação e variáveis intra-orais (Kusy, Whitley, 1997; Ribeiro, Jacob, 2016). Assim, a metodologia utilizada, neste estudo, procurou minimizar algumas dessas variáveis mantendo inalterado o fio, uma vez, pois arranhões causados pelo deslize do fio, impactam na força de atrito (Rossouw, 2003); padronizar o método de amarração, ligaduras elastoméricas fazem em média uma força de 120g sobre o conjunto braquete fio o tamanho angulação e inclinação da canaleta dos braquetes, realizado em ambiente seco (Khambay et al., 2005). O braquete Clarity possui uma angulação equivalente a +8° no canino superior (Bednar et al., 1991; Reimann et al., 2016). Os braquetes impressos não possuem angulações em sua canaleta, a angulação está na base. No entanto os braquetes foram colados, usando um gabarito para obter o mesmo ângulo de entrada para todas as amostras e, assim, eliminar a influência da prescrição.

Sabe-se que as condições, em que foram realizados os testes, são as que apresentam maior coeficientes de atritos, segundos trabalhos de Arici et al. (2015); Doshi e Bhad-Patil (2011); Sadique (2016) a combinação de arco 0.019x0.025 de aço, preso com ligadura elastomérica em braquetes de cerâmica, apresentam maiores resistência a tração que braquetes metálicos e autoligantes. Não foram encontrados trabalhos que apresentem resultados diferentes. Segundo alguns estudos como de Choi et al. (2011, 2012); Lee et al. (2010) a força de atrito aumenta após o uso clínico, os braquetes autoligantes são os que apresentam maior aumento, devido, principalmente, ao acúmulo de placa (Liu et al., 2013).

Alguns trabalhos como Chen et al. (2010); Doshi e Bhad-Patil (2011); Ehsani et al. (2009); Rabiee et al. (2017) relataram a busca por condições de atrito mais baixas, porque forças acima do limite, podem provocar alterações não fisiológicas nos dentes, porém forças de atrito abaixo do necessário, não geram forças suficientes para realizar o movimento desejado. Outros indicam que, forças em torno de 50g por

raiz, que se deseja movimentar, seria o mais adequado (Iwasaki et al., 2000).

Porém apesar de apresentarem coeficiente de atrito maior que os braquetes metálicos, os braquetes cerâmicos são muito utilizados e sua demanda aumenta devido ao apelo estético.

O planejamento virtual nos permite uma melhor visualização do alinhamento e nivelamento, bem como as inclinações e angulações finais das arcadas (Grauer et al., 2012). O sistema de customização de braquetes em CAD/CAM aborda problemas da ortodontia convencional, apontado por ortodontistas como a individualização dos braquetes (Andrews, 1979; Brito Júnior, Ursi, 2006; Creekmore, Kunik, 1993). A customização em grande quantidade só é possível com o recurso da impressão 3D.

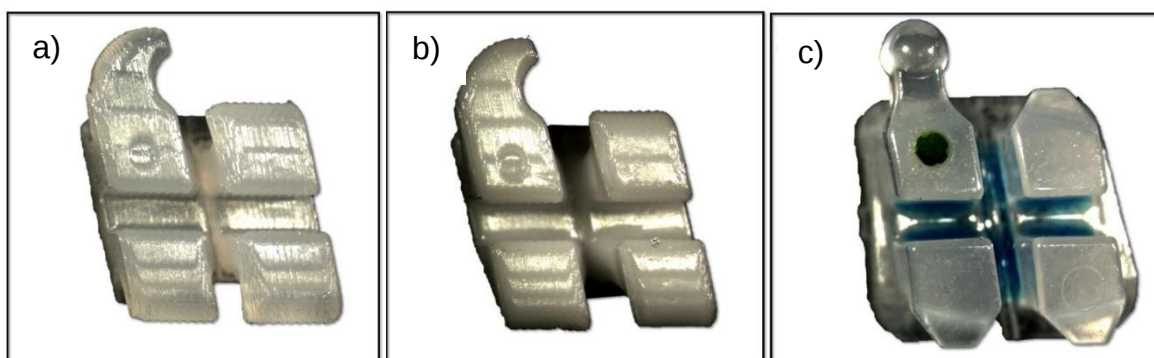
Braquetes impressos ainda é um assunto pouco estudado principalmente sobre avaliação de atrito, os resultados deste estudo vão de acordo com os resultados encontrados por Hodecker et al. (2022), ainda existe uma falta de padronização para realizar estudos sobre atrito como visto por Cury (2016).

Existem diferenças no tipo de material dos braquetes customizados, primeiramente foram realizados em policarbonato, porém apresentaram falhas como alto grau de deformação da canaleta do fio, absorção de corantes e pouca durabilidade (Krey et al., 2016). Alguns autores mudaram o tipo de material de impressão dos braquetes para um tipo de resina de impressão com composição cerâmica da marca Formlabs (Somerville, Mass) que até então, eram utilizadas para impressão de coroas protéticas (Panayi, Tsolakis, 2021). As cerâmicas possuem alta tenacidade e resistência a fratura e a flexão, estabilidade de cor. O dissilicato de lítio, até então, era o material de escolha para impressão dos braquetes realizado por (Yang et al., 2019). Os braquetes impressos utilizam uma cerâmica composta por alumina policristalina e outros materiais que, devido ao processo de patente, não nos foram revelados pela empresa, provavelmente o braquete LFW apresenta uma quantidade maior de zircônia que possui uma translucidez mais baixa que o braquete LFT. Os braquetes CL são produzidos com cerâmica injetável, um vidro formulado para ser fundido e injetado em um molde e convertido em cerâmica vítrea, após seu aquecimento (Anusavice, Zang, 1999).

Os braquetes foram avaliados no estereomicroscópio (Zeiss, ICT - Unesp, São José dos Campos - Brasil) e foram percebidas pequenas marcas da impressão compatíveis com as que Scheithauer et al. (2018) encontram em suas amostras,

quando avaliaram a acurácia desse tipo de processo de impressão. Os autores também relataram, neste mesmo trabalho, que esse processo permite a realização de componentes de design que não podem ser reproduzidos por qualquer outra tecnologia. As marcas de impressão, vistas nos braquetes (figura 11), representam provavelmente o sentido em que foram impressos os braquetes e, possivelmente, pode ser uma das razões para que a resistência a tração tenha sido maior nos braquetes impressos. Uma alternativa e sugestão seria a mudança no sentido da impressão.

Figura 11 - Imagem dos braquetes realizada em estereomicroscópio, aumento de 15 vezes



Legenda: a) braquete impresso (LFT), b) braquete impresso (LFW), c) braquete convencional (CL)
Fonte: Elaborado pelo autor.

Algumas vantagens dos braquetes impressos, em relação ao braquete convencional, está na possibilidade de uma customização em massa; a técnica de injeção de molde permite que a cerâmica fique mais líquida e homogênea, porém o alto custo para a confecção do molde não permite a individualização do braquete (Siargos et al., 2007). Braquetes impressos permitem que a colagem seja realizada na posição mais favorável, para evitar colisões com dentes antagonistas e vizinhos, evitando a necessidade de mudança de posição do acessório, após a correção da rotação do dente, evita erro de posicionamento; melhor adaptação da base do braquete na superfície do dente, o sistema permite programar e quantificar exatamente a realização de ipr (desgaste Interproximal), o que diminui a necessidade

de exodontia (Krey et al., 2016; Panayi, Tsolakis, 2021; Yang et al., 2019). A precisão do paralelismo da canaleta do braquete impresso é maior que nos braquetes por injeção de molde, esse fato permite uma melhor leitura e expressão do torque nos braquetes impressos (Silver et al., 2018). O grupo CL apresentou um desvio padrão maior que o grupo LFW, isso pode estar relacionado com a precisão do formato da canaleta vista no trabalho citado anteriormente.

Apesar desse tipo de sistema requerer maior tempo de planejamento para posicionamento e formato dos acessórios, e uma resistência maior ao tracionamento, os resultados são mais previsíveis. O sistema já usado em modelos de alinhadores ortodônticos, é considerado uma estratégia promissora para maior qualidade ao tratamento ortodôntico e alcançar melhores resultados (Grauer et al., 2012).

7 CONCLUSÃO

Com a realização desta pesquisa, foi possível concluir que os braquetes impressos não apresentaram diferença significativa entre eles com relação ao atrito, porém apresentaram diferença quando comparados aos braquetes por injeção de molde. Este último grupo apresentou valores menores de atrito que o grupo de braquetes impressos.

Os valores de resistência a tração, apresentados pelas amostras de braquetes impressos, não desqualificam seu uso no tratamento ortodôntico.

REFERÊNCIAS

Andrews LF. The straight-wire appliance. *Br J Orthod*. 1979 Jul;6(3):125-43. doi: 10.1179/bjo.6.3.125. PMID: 297458.

Anusavice KJ, Zang NZ. Effect of alumina on the strength, fracture toughness, and crystal structure of fluorocanite glass-ceramics. *J Am Ceram Soc*. 1999 Set;82(9):2509–13. doi:10.1111/j.1151-2916.1999.tb02111.x

Bednar JR, Gruendeman GW, Sandrik JL. A comparative study of frictional forces between orthodontic brackets and arch wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1991 Dec;100(6):513-22. doi: 10.1016/0889-5406(91)70091-A. PMID: 1962604.

Braun S, Bluestein M, Moore BK, Benson G. Friction in perspective. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1999 Jun;115(6):619-27. doi: 10.1016/s0889-5406(99)70286-6. PMID: 10358243.

Brito Júnior VS, Ursi WJS. O aparelho pré-ajustado: sua evolução e suas prescrições. *Rev Dent Press Ortod e Ortop Facial*. 2006 Jun;11(3):104–56. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-54192006000300013>.

Brown MW, Koroluk L, Ko CC, Zhang K, Chen M, Nguyen T. Effectiveness and efficiency of a CAD/CAM orthodontic bracket system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2015 Dec;148(6):1067-74. doi: 10.1016/j.ajodo.2015.07.029. PMID: 26672713.

Burnstone CJ. A função do atrito nos aparelhos ortodônticos. In: Burnstone CJ, Choy K. *Fundamentos biomecânicos da clínica ortodôntica*. São Paulo: Quintessence Publishing Brasil; 2018. p.453-74. ISBN: 978-85-7889-087-2.

Cacciafesta V, Sfondrini MF, Ricciardi A, Scribante A, Klersy C, Auricchio F. Evaluation of friction of stainless steel and esthetic self-ligating brackets in various bracket-archwire combinations. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2003 Oct;124(4):395-402. doi: 10.1016/s0889-5406(03)00504-3. PubMed PMID: 14560269.

Chen SSH, Greenlee GM, Kim JE, Smith CL, Huang GJ. Systematic review of self-ligating brackets. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2010 Jun;137(6):726.e1-726.e18; discussion 726-7. doi: 10.1016/j.ajodo.2009.11.009. PubMed PMID: 20685517.

Choi S, Joo HJ, Cheong Y, Park YG, Park HK. Effects of self-ligating brackets on the surfaces of stainless steel wires following clinical use: afm investigation. *J Microsc*. 2012 Apr;246(1):53-9. doi: 10.1111/j.1365-2818.2011.03586.x. PubMed PMID: 22188518.

Choi SH, Kang DY, Hwang CJ. Surface roughness of three types of modern plastic bracket slot floors and frictional resistance. *Angle Orthod*. 2014 Jan;84(1):177-83. doi: 10.2319/030313-179.1. PubMed PMID: 23767940 PubMed Central PMCID: PMC8683053.

Choi S, Park KH, Cheong Y, Kim HK, Park YG, Park HK. Changes in ultrastructure and properties of bracket slots after orthodontic treatment with bicuspid extraction. scanning. 2011 Jan-Feb;33(1):25-32. doi: 10.1002/sca.20218. PubMed PMID: 21271608.

Creekmore TD, Kunik RL. Straight wire: the next generation. Am J Orthod Dentofac Orthop. 1993 Nov;104(1):8-20. doi: 10.1016/0889-5406(93)70023-H. PubMed PMID: 8257493.

Cury SEN. Exposição dos braquetes ao meio bucal durante o tratamento ortodôntico e seu impacto no atrito [tese]. Bauru (SP): Universidade de São Paulo (USP), Faculdade de Odontologia de Bauru; 2016.

Doshi UH, Bhad-Patil WA. Static frictional force and surface roughness of various bracket and wire combinations. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2011 Jan;139(1):74-9. doi: 10.1016/j.ajodo.2009.02.031. PubMed PMID: 21195280.

Ehsani S, Mandich MA, El-Bialy TH, Flores-Mir C. Frictional resistance in self-ligating orthodontic brackets and conventionally ligated brackets a systematic review. Angle Orthod. 2009 May;79(3):592-601. doi: 10.2319/060208-288.1. PubMed PMID: 19413397.

Fathimani M, Melenka GW, Romanyk DL, Toogood RW, Heo G, Carey JP. development of a standardized testing system for orthodontic sliding mechanics. Prog Orthod. 2015 Jun;16:14. doi: 10.1186/s40510-015-0087-8. PubMed PMID: 26061991 PubMed Central PMCID: PMC4456589.

Galante R, Figueiredo-Pina CG, Serro AP. Additive manufacturing of ceramics for dental applications: a review. Dent Mater 2019 Jun;35(6):825-46. doi: 10.1016/j.dental.2019.02.026. PubMed PMID: 30948230.

Ghafoor H. Reverse engineering in orthodontics. Turkish J Orthod. 2018 Dec;31(4):139-44. doi: 10.5152/TurkJOrthod.2018.18027. PubMed PMID: 30701225 PubMed Central PMCID: PMC6340487.

Grauer D, Wiechmann D, Heymann GC, Swift EJ. Computer-aided design/computer-aided manufacturing technology in customized orthodontic appliances. J Esthet Restor Dent. 2012 Feb;24(1):3-9. doi: 10.1111/j.1708-8240.2011.00500.x. PubMed PMID: 22296689.

Hodecker L, Bourauel C, Braumann B, Kruse T, Christ H, Scharf S. Comparative in vitro analysis of the sliding resistance of a modern 3D-printed polymer bracket in combination with different archwire types. Clin Oral Investig. 2022 May;26(5):4049-57. doi: 10.1007/s00784-022-04373-5. PubMed PMID: 35092503 PubMed Central PMCID: PMC9072478.

Iwasaki LR, Haack JE, Nickel JC, Morton J. Human tooth movement in response to continuous stress of low magnitude. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2000 Feb;117(2):175-83. doi: 10.1016/s0889-5406(00)70229-0. PubMed PMID: 10672218.

Khambay B, Millett D, McHugh S. archwire seating forces produced by different ligation methods and their effect on frictional resistance. *Eur J Orthod*. 2005 Jun;27(3):302-8. doi: 10.1093/ejo/cji008. PubMed PMID: 15947232.

Kim J, Chun YS, Kim M. Accuracy of bracket positions with a CAD/CAM indirect bonding system in posterior teeth with different cusp heights. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2018 Feb;153(2):298-307. doi: 10.1016/j.ajodo.2017.06.017. PubMed PMID: 29407508.

Krey K-F, Darkazanly N, Kühnert R, Ruge S. 3D-printed orthodontic brackets - proof of concept. *Int J Comput Dent*. 2016;19(4):351-62. PubMed PMID: 28008431

Kusy RP, Whitley JQ. Friction between different wire-bracket configurations and materials. *Semin Orthod*. 1997 Sep;3(3):166-77. doi: 10.1016/s1073-8746(97)80067-9. PubMed PMID: 9573878.

Lee GJ, Park KH, Park YG, Park HK. A quantitative AFM analysis of nano-scale surface roughness in various orthodontic brackets. *Micron*. 2010 Oct;41(7):775-82. doi: 10.1016/j.micron.2010.05.013. PubMed PMID: 20646928.

Lima VNC, Coimbra MER, Derech CD, Ruellas ACO. Frictional forces in stainless steel and plastic brackets using four types of wire ligation. *Dental Press J Orthod*. 2010 Mar/Apr;15(2):82–6.

Liu X, Lin J, Ding P. Changes in the surface roughness and friction coefficient of orthodontic bracket slots before and after treatment. *Scannig* 2013 Jul-Aug;35(4):265-72. doi: 10.1002/sca.21060. PubMed PMID: 23086715.

Mendes K, Rossouw PE. Friction: validation of manufacturer's claim. *Semin Orthod*. 2003 Dez;9(4):236–50. doi.org/10.1016/j.sodo.2003.08.004.

Mendes BAB, Ferreira RAN, Pithon MM, Horta MCR, Oliveira DD. Physical and chemical properties of orthodontic brackets after 12 and 24 months: in situ study. *J Appl Oral Sci*. 2014 Jun;22(3):194-203. doi: 10.1590/1678-775720130528. PubMed PMID: 25025560 PubMed Central PMCID: PMC4072270.

Moore MM, Harrington E, Rock WP. Factors affecting friction in the pre-adjusted appliance. *Eur J Orthod*. 2004 Dec;26(6):579-83. doi: 10.1093/ejo/26.6.579. PubMed PMID: 15650066.

Mota Júnior SL, Campos MJDS, Schmitberger CA, Vitral JDA, Fraga MR, Vitral RWF. Evaluation of the prototype of a new bracket-positioning gauge. *Dental Press J Orthod*. 2018;23(2):68–74.

Pacheco MR, Oliveira DD, Neto PS, Jansen WC. Evaluation of friction in self-ligating brackets subjected to sliding mechanics: an in vitro study. *Dental Press J Orthod*. 2011 Jan-Fev;16(1):107–15.

Panayi NC, Tsolakis AI. In-house computer-aided design and 3-dimensional printing of customized orthodontic brackets using hybrid ceramic resin: Is it the time for the orthodontist to take over? *AJO-DO Clin Companion*. 2021 Jul;1(3):187–93. doi: 10.1016/J.XAOR.2021.07.001.

Pithon MM, Santana DA, Mendes BAB, Souza RA, Oliveira DD. Influência de diferentes cremes dentais na rugosidade e atrito dos braquetes ortodônticos. *Rev Clín Ortod Dental Press*. 2013 Jun-Jul;12(3):102-11.

Rabiee SM, Eftekhari SZ, Arash V, Amozegar N, Fathi A, Tavanafar S. Effect of CO2 laser power intensity on the surface morphology and friction behavior of alumina ceramic brackets. *Microsc Res Tech*. 2017 Aug;80(8):923-29. doi: 10.1002/jemt.22883. PubMed PMID: 28467015.

Reimann S, Bourauel C, Weber A, Dirk C, Lietz T. Friction behavior of ceramic injection molded (CIM) brackets. *J Orofac Orthop*. 2016 Jul;77(4):262-71. doi: 10.1007/s00056-016-0030-8. PubMed PMID: 27142040.

Reznikov N, Har-Zion G, Barkana I, Abed Y, Redlich M. Measurement of friction forces between stainless steel wires and “reduced-friction” self-ligating brackets. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2010 Sep;138(3):330-8. doi: 10.1016/j.ajodo.2008.07.025. PubMed PMID: 20816303.

Ribeiro GLU, Jacob HB. Understanding the basis of space closure in orthodontics for a more efficient orthodontic treatment. *Dental Press J Orthod*. 2016 Mar-Apr;21(2):115-25. doi: 10.1590/2177-6709.21.2.115-125.sar. PubMed PMID: 27275623 PubMed Central PMCID: PMC4896290.

Rossouw PE. Friction: an overview. *Semin Orthod*. 2003 Dez;9(4):218–22. doi: 10.1016/j.sodo.2003.08.002.

Sadique S. Surface roughness and sliding mechanics of aesthetic composites brackets and archwires: SEM-profilometry study. *Int J Supply Chain Manag*. 2016 Mar;5(1):84–93.

Scheithauer U, Schwarzer E, Moritz T, Michaelis A. Additive manufacturing of ceramic heat exchanger: opportunities and limits of the lithography-based ceramic Manufacturing (LCM). *J Mater Eng Perform*. 2017 Ago;27(1):14–20. doi: 10.1007/s11665-017-2843-z.

Shannon T, Groth C. Be your own manufacturer: 3D printing intraoral appliances. *Semin Orthod*. 2021 Set;27(3):184–8. doi:10.1053/j.sodo.2021.09.004.

Siargos B, Bradley TG, Darabara M, Papadimitriou G, Zinelis S. Galvanic corrosion of metal injection molded (MIM) and conventional brackets with nickel-titanium and copper-nickel-titanium archwires. *Angle Orthod*. 2007 Mar;77(2):355-60. doi: 10.2319/0003-3219(2007)077[0355:GCOMIM]2.0.CO;2. PubMed PMID: 17319774.

Silver M, Griffin AC, Azzopardi L, Masoud MI, Griffin AC. Novel methods reveal that parallelism contributes to the functional vertical slot dimension in ceramic and metal brackets. *Angle Orthod*. 2018 Nov;88(6):812-818. doi: 10.2319/010518-10.1. PubMed PMID: 30124321 PubMed Central PMCID: PMC8174069.

Tageldin H, Llano-Pérula M, Thevissen P, Celis J-P, Willems G. Quantifying resistance to sliding in orthodontics: a systematic review. *Br J Med Med Res*. 2016 Jul;17(2):1–30. doi: 10.9734/BJMMR/2016/27208.

Tarraf NE, Ali DM. Present and the future of digital orthodontics. *Semin Orthod*. 2018 Dez;24(4):376–85. doi: 10.1053/J.SODO.2018.10.002.

Weber DJ, Koroluk LD, Phillips C, Nguyen T, Proffit WR. Clinical effectiveness and efficiency of customized vs. conventional preadjusted bracket systems. *J Clin Orthod*. 2013 Apr;47(4):261-6; quiz 268. PubMed PMID: 23660822.

Williams CL, Khalaf K. frictional resistance of three types of ceramic brackets. *J Oral Maxillofac Res*. 2014 Jan;4(4):e3. doi: 10.5037/jomr.2013.4403. PubMed PMID: 24478913 PubMed Central PMCID: PMC3904729.

Yang L, Yin G, Liao X, Yin X, Ye N. A novel customized ceramic bracket for esthetic orthodontics: in vitro study. *Prog Orthod*. 2019 Oct;20:39. doi: 10.1186/s40510-019-0292-y. PubMed PMID: 31608421 PubMed Central PMCID: PMC6790353.