



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

PAULO CÉSAR DA SILVA

**BRAQUETES CERÂMICOS FABRICADOS POR IMPRESSÃO 3D:
ensaio mecânico de resistência à torção pela aplicação de torques**

2022

PAULO CÉSAR DA SILVA

**BRAQUETES CERÂMICOS FABRICADOS POR IMPRESSÃO 3D: ensaio
mecânico de resistência à torção pela aplicação de torques**

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. Ivan Balducci

Coorientador: Prof. Dr. Celestino José Prudente Nóbrega

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).

Silva, Paulo César Da
Braquetes cerâmicos fabricados por impressão 3D: ensaio mecânico de resistência à torção pela aplicação de torques / Paulo César Da Silva. - São José dos Campos : [s.n.], 2022.
44 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: Ivan Balducci

Coorientador: Celestino José Prudente Nóbrega

1. Braquetes cerâmicos . 2. Resistência à torção . 3. Impressão 3D. 4. Torque. I. Balducci, Ivan, orient. II. Nóbrega, Celestino José Prudente, 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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP com adaptações - STATI, STRAUD e DTI do ICT/UNESP.

Renata Aparecida Couto Martins CRB-
8/8376

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivan Balducci (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Rubens Nisie Tango

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Rogério Amaral Tupinambá

Centro de Pesquisas e Estudos Especializados - Ortogeo

Diretor Acadêmico e Profissional

Campus de São José dos Campos

São José dos Campos, 24 de agosto de 2022.

DEDICATÓRIA

Este trabalho de pesquisa é dedicado à minha esposa Cilene Maria Santos da Silva. Desde que você passou a fazer parte da minha vida que vivencio uma espiral construtiva. Esta é uma das muitas conquistas ao seu lado.

Também quero dedicar este trabalho ao meu amigo e professor Dr. Anael Carlos Rodrigues (in memoriam), pelos vinte anos de convivência. Um exemplo para toda minha vida, um verdadeiro Mestre.

AGRADECIMENTOS

Primizamente agradezer a Deus pela oportunidade da vida.
À minha amada esposa Cilene, pela ajuda, carinho e incentivo. Com você ao meu lado
a jornada ficou mais leve.

Aos meus pais, Jair e Nely pelo apoio, incentivo, por acreditarem em mim. Ensinarão-me as primeiras lições sobre viver, amar, respeitar, em ser honesto ético e humilde.

Vocês são meu exemplo de luta, força e determinação.
À minhas filhas Isabelle Cristine e Anna Julia pelo incentivo e pelas horas que deixei
de estar com vocês.

A todos os meus familiares e amigos.
Ao orientador deste trabalho, Prof Dr. Ivan Balducci, por me ajudar nesta etapa difícil
e muito importante da minha vida. Obrigada por ter me atendido todas as vezes que
foram necessárias para que este trabalho fosse realizado.

Ao meu coorientador Prof Dr Celestino Nóbrega que me conduziu nos meus
primeiros passos na ortodontia e pelos seus ensinamentos
Aos professores Dr. Rubens Nisio Tango, Pedro Jacy S. Diamantino e Dr Rogério
Amaral Tupinambá pelo aceito em participar dessa banca examinadora
Aos professores Dr. Felipe Gomes Benício e Dr. Albano Porto da Cunha Júnior pelo
apoio e incentivo

Aos meus alunos e colegas que, com seus questionamentos, são os meus estímulos
constantemente na busca de aprimoramento.

Aos meus pacientes que, mesmo sem perceberem, são minha fonte e estímulo de
sempre buscar o melhor.

A todos os colegas do Mestrado Profissional
Ao programa do Mestrado Profissional do ICT- Unesp pela oportunidade

Aos professores do Mestrado do ICT-Unesp
Aos funcionários da biblioteca, pós-graduação e laboratórios.

A TODAS as pessoas que de uma maneira ou de outra me ajudaram na realização
deste trabalho.

“Se, a princípio, a ideia não é absurda, então não há esperança para ela.”
Albert Einstein

RESUMO

Silva PC. Braquetes cerâmicos fabricados por impressão 3D: ensaio mecânico de resistência à torção pela aplicação de torques [dissertação]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2022.

A proposição deste estudo foi comparar a nova geração de braquetes personalizados cerâmicos impressos 3D *Lightforce Clear*, com os braquetes cerâmicos injetados *Clarity* e *GC Chic* em um ensaio mecânico de resistência à torção pela aplicação de torque. Amostras de braquetes cerâmicos impressos de alumina policristalina de incisivos centrais superiores (n=10), o *Lightforce Clear* (*Lightforce Orthodontics*), e os braquetes cerâmicos injetados de alumina policristalina, *Clarity* (*3M Unitek*) e *GC Chic* (*GC Orthodontics*) os quais foram submetidos ao teste de resistência à fratura torcional utilizando um segmento de fio de aço inoxidável 0,019 x 0,025 polegadas em uma máquina de ensaio universal (EMIC, DL-1000) à uma velocidade de 1mm/min e célula de carga de 1000 kg. Os resultados foram submetidos à análise estatística ANOVA fator 1. Os valores médios e desvio padrão obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) nos três grupos de bráquetes foram: $14,53 \pm 2,85$ para *Lightforce Clear*; $12,03 \pm 2,44$ para *Clarity* e $6,65 \pm 0,35$ para o *CG Chic*. Foi observado que houve diferença estatística significativa entre os grupos testados ($p < 0,05$). Os braquetes *Lightforce Clear* cerâmicos impressos 3D customizados mostraram-se mais resistentes que os injetados apontando como uma alternativa factível e promissora em busca de uma ortodontia digital de precisão contudo existe a necessidade de incorporar novas pesquisas para o avanço desta tecnologia.

Palavras-chave: braquetes cerâmicos; resistência à torção; impressão 3D; torque.

ABSTRACT

Silva PC. Ceramic brackets manufactured by 3D printing: mechanical test of torsion resistance by application of torques [dissertation]. São José dos Campos (SP): Paulista State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2022.

The purpose of this study was to compare the new generation of customized ceramic brackets 3D printed Lightforce Clear, with the injected ceramic brackets Clarity and GC Chic in a mechanical test of torsion resistance by the application of torque. Samples of ceramic printed polycrystalline alumina brackets of upper central incisors (n=10), Lightforce Clear (Lightforce Orthodontics), and the injected ceramic brackets made from polycrystalline alumina, Clarity (3M Unitek) and GC Chic (GC Orthodontics) which were subjected to torsional fracture strength testing using a 0.019 x 0.025-inch stainless steel wire segment in a universal testing machine (EMIC, DL-1000) at a speed of 1 mm/min and a load cell of 1000 kg. The results were submitted to ANOVA factor 1 statistical analysis. The mean values and standard deviation obtained in the maximum fracture load (N) torsional strength test in the three groups of brackets were: 14.53 ± 2.85 for Lightforce Clear; 12.03 ± 2.44 for Clarity and 6.65 ± 0.35 for CG Chic. It was observed that there was a statistically significant difference between the groups tested ($p < 0.05$). The customized 3D printed Lightforce Clear ceramic brackets proved to be more resistant than the injected ones, pointing as a feasible and promising alternative in the search for precision digital orthodontics, however there is a need to incorporate new research to advance this technology.

Keywords: ceramic brackets; torsion resistance; 3D printing; torque.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Amostras de braquetes envolvidas na pesquisa em vista frontal e lateral	19
Figura 2 - Arco reto preso na base-1 pela âncora	21
Figura 3 - Dobrador-.....	22
Figura 4 - Fio em forma de U preso na base-4 pela âncora-.....	22
Figura 5 - Dobrador preso no arco em forma de U.....	23
Figura 6 – Esquema de flexão do fio do arco de aplicação de torção e o resultado (fio dobrado).....	23
Figura 7 - Preparação do suporte, braquete, fio e fixação.....	24
Figura 8 - Amostra de fio / suporte no acessório de teste de torque.....	25
Figura 9 - Desenho Esquemático e configurações para aplicação do torque.....	25
Figura 10 - Gráfico de coluna (média $\pm$ desvio padrão) com os valores de resistência à aplicação de torque, obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) nos três grupos de bráquetes.....	29
Figura 11- Esquema dos cinco números (<i>Box and Whisker Plot</i>) dos dados de valores de resistência à aplicação de torque, obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) segundo os três grupos de brquetes.....	29
Figura 12 - Visualização da dimensão dos slots nos braquetes da amostra.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de resistência à aplicação de torque, obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) nos três grupos de braquetes (Lightforce Clear, Clarity e GC Chic)..... 28

Tabela 2 - Estatística descritiva dos valores de resistência à aplicação de torque, obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) nos três grupos de braquetes (Lightforce Clear, Clarity e GC Chic)..... 29

Tabela 3 - Resultado análise de variância ANOVA (1 Fator) para os dados de resistência à aplicação de torque (N.mm)..... 31

Tabela 4 - Formação dos grupos homogêneos (conjuntos de mesmo desempenho) quanto aos valores (N/mm) à aplicação de torque assim como a média e ao desvio padrão, após a aplicação do método de Games-Howell..... 32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3 PROPOSIÇÃO.....	18
4 MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1 Preparação do fio.....	20
4.2 Preparação do suporte, braquete, fio e fixação.....	23
4.3 Preparação do sistema de máquina de ensaio universal	24
4.4 Aplicação do teste.....	25
4.5 Análise estatística.....	26
5 RESULTADO.....	27
6 DISCUSSÃO.....	32
7 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A exigência dos pacientes que buscam a ortodontia estética tem conduzido o mercado para o lançamento de numerosos modelos de braquetes cerâmicos, com uma nova estética em cor, estabilidade, translucidez e fluorescência que se somam a fatores indiscutíveis para a redução da percepção visual e admissível na cavidade oral, no entanto, problemas de fratura, deformação e alto coeficiente de atrito têm sido relatados pelos ortodontistas (Aknin et al., 1996; Holt et al., 1991; Lopes Filho et al., 2012).

Durante a mecanoterapia ortodôntica são aplicadas várias forças nos braquetes, que podem levar a deformações e fraturas quando utilizados os cerâmicos associados à instalação de arcos mais calibrosos de secção retangular na ligação entre a ranhura horizontal do braquete e o fio. Esse processo leva a leitura da expressão de torque nessa transmissão, e os momentos de torção gerados podem levar à fratura dos braquetes cerâmicos. (Ajith et al., 2013; Martelli et al., 2019; Papageorgiou et al., 2017).

Nesse contexto, pesquisas têm sido desenvolvidas visando à melhoria da tenacidade à fratura dos braquetes de cerâmica como, por exemplo, a incorporação de *slots* metálicos em suas ranhuras horizontais (Ajith et al., 2013; Martelli et al., 2019; Nishio et al., 2009; Papageorgiou et al., 2017).

No mercado atual, os braquetes dito estéticos são aqueles de composição de polycarbonato ou de cerâmica, prevalecendo como os mais aplicados na clínica ortodôntica diária os braquetes de cerâmica. Na linha de apresentação, os braquetes de polycarbonato foram os primeiros a serem comercialmente oferecidos aos ortodontistas, contudo, apresentaram um comportamento mecânico deficitário por baixa estabilidade dimensional, facilidade de fratura, alteração da cor no meio bucal, maior coeficiente de atrito e limitada adesividade. (Kumar et al., 2007; Manhães et al., 2011).

Em contrapartida, os braquetes cerâmicos foram apresentados na busca de minimizar tais deficiências, por exibirem melhores propriedades físicas e mecânicas, porém, mais frágeis. Os braquetes cerâmicos disponíveis são compostos de óxido de alumínio e apresentam-se em duas composições:

- a) os de alumina monocristalinos, ou seja, formados por um único cristal de alumínio, sendo, portanto, mais translúcidos e com maior resistência à fratura, mas a maior dificuldade de fabricação agrega em maiores custos; e
- b) os de alumina policristalinos, formados por vários cristais de alumínio fundidos em alta temperatura, garantindo um maior grau de opacidade (Kumar et al., 2007; Manhães et al., 2011).

Os braquetes cerâmicos apresentam alta fragilidade no entanto, com excelentes propriedades ópticas, alta resistência a desgastes e a corrosões. Durante a mecanoterapia ortodôntica, os braquetes são levados a uma série de ação de forças transferidas aos elementos dentais, em particular, às dobras de terceira ordem expressadas pelos torques. (Karamouzos et al., 1997; Kieling et al., 2019).

Em ortodontia, esse processo diz respeito à inclinação vestibulo lingual entre raiz e coroa, que, exercendo pressão nas aletas oclusais e gengivais em direções opostas, pode levar à fadiga e posterior fratura do suporte com comprometimento do tratamento ortodôntico. Na mecanoterapia ortodôntica, a expressão do torque pode ser influenciada pela magnitude da torção, composição e espessura do fio ortodôntico, tamanho e profundidade das ranhuras horizontais (Karamouzos et al., 1997; Kieling et al., 2019).

A tecnologia tridimensional permite que os fabricantes produzam braquetes baseados na forma de cada elemento dental, visto que , a variabilidade morfológica dental entre os indivíduos é presente. Braquetes e fios customizados geram uma prescrição individualizada, permitindo maior controle na mecânica na busca do alinhamento, estética e oclusões ideais (Yang et al., 2019).

As movimentações dentárias com aparatologia fixa ocorrem como resultado do encaixe do fio na ranhura horizontal do braquete. Um sistema de forças e momentos são gerados e transmitidos aos dentes e seu ligamento periodontal circundante. Sistemas customizados permitem que o ortodontista inicie o tratamento com o objetivo final em mente e agilize a mecânica em direção a um resultado preestabelecido (Grauer et al., 2012).

Os inúmeros avanços em tecnologias digitais da odontologia, em particular na especialidade da ortodontia, como o escaneamento tridimensional, impressoras 3D, *software* de design dedicado com computadores (CAD/CAM) estão sendo aplicados no direcionamento promissor para a transição de braquetes cerâmicos usinados e

injetados para o manufaturamento de braquetes cerâmicos impressos no sistema 3D, resultando em uma realidade de aparelhos ortodônticos customizados (Nguyen, Jackson, 2018; Panayi, Tsolakis, 2021).

Este estudo foi desenhado para testar a resistência à fratura, durante a expressão de torque pela torção do fio ortodôntico em três grupos de braquetes cerâmicos de alumina policristalina, sendo um grupo de bráquetes customizados fabricados por impressão 3D e dois grupos de braquetes manufaturados por injeção de cerâmica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura tem o intuito de buscar informações e esclarecimentos para uma melhor compreensão do tema abordado neste estudo. Nesse sentido, a manufatura aditiva está surgindo como uma tecnologia capacitadora para uma ampla gama de novas aplicações nos mais diversos setores da indústria.

Há uma crescente demanda por produtos como nanomateriais, materiais funcionais, biomateriais, materiais cerâmicos, materiais eletrônicos e compósitos, que são explorados na impressão 3D em busca de processos de melhoria em termos de velocidade, resolução e energia específica (Galante et al., 2019; Lee et al., 2017).

Na odontologia, particularmente na especialidade da ortodontia, os métodos de manufaturamento de braquetes cerâmicos de alumina são determinantes no que diz respeito às propriedades ópticas e à resistência, em particular, nos projetos das ranhuras horizontais e das aletas, sendo estes pontos demasiadamente críticos para resistência dos braquetes, fatores que ainda exibem um grande índice de fraturas. (Vhanbatte et al., 2014).

Em oposição, os acessórios produzidos por moldagem de injeção de cerâmica conferem superfícies uniformes e mais regulares em comparação aos braquetes produzidos pelo método de usinagem, o que reduz o número de imperfeições superficiais e garante, conseqüentemente, aumento da resistência à fratura sob torção. Os braquetes de cerâmica manufaturados por usinagem são mais susceptíveis a defeitos causados pelo maquinário durante a fabricação, possibilitando maiores índices de rupturas (Vhanbatte et al., 2014).

As movimentações dentárias, produzidas pelo ortodontista, na aparatologia ortodôntica fixa, são executadas nas três dimensões do espaço, com o uso de arcos ortodônticos, retangulares inseridos nas ranhuras horizontais de suporte do sistema de braquetes projetados especificamente, de acordo com uma prescrição pré definida. (Lee et al., 2016).

Os elementos dentais respondem com movimentações de primeira, segunda e terceira ordem, em função de suas respectivas geometrias e tamanhos, dada pelo íntimo contato entre o fio e as ranhuras horizontais do braquete nas diversas fases da mecânica, visando a obtenção de uma resposta clínica eficiente. A expressão

inadequada de torques em braquetes fabricados com imprecisões dimensionais gera um jogo torcional demasiado, em particular em incisivos, com resposta clínica ineficaz (Lee et al., 2016).

Variáveis como, as dimensões efetivas das ranhuras horizontais, o contato do arco com as paredes das ranhuras horizontais, o calibre do fio de secção retangular, são essenciais na geração dos momentos de força transmitidas ao dente, que então, sofre uma torção na propagação desse momento, no qual, a partir desse ponto, o torque é expresso. (Arreghini et al., 2014).

Tanto o material do qual são feitos os arcos quanto o material dos braquetes influenciam na sua capacidade de expressar o torque. A capacidade relativa da expressão do torque dada pela folga entre a ranhura horizontal do braquete e fio de diferentes tamanhos gera diferentes momentos para a eficiência na movimentação dentária (Arreghini et al., 2014).

Na finalização dos tratamentos ortodônticos fixos devem ser obtidas inclinações vestibulo linguais entre raiz e coroa, nas quais o fio ortodôntico deverá preencher toda a ranhura horizontal do braquete na busca da obtenção de movimentos radiculares controlados, que são referidos como movimentos de terceira ordem, denominados de torque, podendo ser observados do ponto de vista mecânico e clínico. A carga de torção de um fio de secção retangular na ranhura horizontal do braquete é necessária para estabelecer o posicionamento mais correto da raiz na busca de estabilidade do elemento dental correspondente (Ajami, Boroujeni, 2018).

As fraturas de braquetes cerâmicos de alumina tanto policristalina quanto monocristalina, causadas por tensões torcionais, têm sido um problema clínico para os ortodontistas. Há maior incidência em braquetes cerâmicos policristalinos, que apresentam imperfeições da superfície e liberação de estresses estruturais e têm consequência no sucesso do tratamento, como o aumento de tempo e frequência das consultas, gerando desconforto e até acidentes por ingestão e/ou aspiração de fragmentos provenientes da fratura do braquete. (Alrejaye et al., 2017; Sobreira et al., 2007).

A seleção de um conjunto de braquetes cerâmicos dita confiável para satisfazer a mecânica, ou seja, braquetes resistentes para suportar e transferir as torções aplicadas durante a mecanoterapia bem como, a estética, em sua estabilidade de cor, compõe requisito exigido pelo paciente que deverá ser acatada pelo

profissional (Alrejaye et al., 2017; Sobreira et al., 2007).

A associação de fios calibrosos e acessórios pode induzir ao desenvolvimento e propagação de trincas nos braquetes, levando à fratura do acessório. A resistência à fratura em cerâmica é de vinte a quarenta vezes menor do que em aço inoxidável, tornando muito mais fácil fraturar um bráquete de cerâmica do que um metálico. Além disso, as ativações de fio retangulares propiciam dobras de terceira ordem, tornando mais provável falhas dos braquetes de cerâmica, particularmente nas aletas desses acessórios (Khanapure et al., 2016).

As aplicações odontológicas na área de tecnologias 3D, tipo CAD/CAM, vêm se tornando crescentes e atingindo patamares diversos além da tradicional área de prótese. A incorporação de tecnologia CAD/CAM na ortodontia como ferramenta para auxílio de diagnóstico e planejamento gera possibilidades de mecânicas com sistema de braquetes customizados e com expressão de torque padronizado para o paciente.

Esses braquetes são posicionados no paciente por gabaritos de colagem indireta que foram fabricados por impressão 3D e gerados por robôs e associados à confecção dos arcos em sistema CAD/CAM, obtendo um verdadeiro aparelho ortodôntico customizado, objetivando a eficiência e a qualidade do tratamento ortodôntico, entretanto ainda estudado em busca de comprovações científicas (Brown et al., 2015).

A ortodontia de precisão passa por aparelhos customizados e no gerenciamento de forças aos tecidos. Aplica-se cada vez mais tecnologias computacionais, versatilidade, imagem e impressão 3D, que podem ser simuladas e traduzidas em operações físicas por manufaturamento de aparelhos ortodônticos com melhoria no entendimento do ortodontista, na promoção um tratamento ortodôntico ideal, eficiente, seguro e reproduzível (Jheon et al., 2017).

A implementação de tecnologias digitais como tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT), fotografia tridimensional (3D) e design auxiliado por computador tem promovido o desenvolvimento de braquetes e fios em 3D. A indústria vem apresentando uma grande variedade de aparelhos ortodônticos customizados, como braquetes cerâmicos, linguais de metal e alinhadores transparentes. (Yang et al., 2019).

Os aparelhos ortodônticos estão passando por um processo de evolução e recebendo atenção crescente dos ortodontistas e dos pacientes por apresentarem

menos percepção visual, o que leva a uma estética mais aceitável, além de terem mostrado maior conforto, com menor número de consultas e tempo de cadeira, com conclusão de tratamento em um menor período (Yang et al., 2019).

Um fluxo de trabalho totalmente digital não significa apenas escaneamento intraoral das arcadas ou o posicionamento digital dos braquetes ou ainda o uso de moldeiras de colagem impressas 3D. Deve estar associado ao método de fabricação dos próprios braquetes no uso das tecnologias 3D (Hodecker et al., 2022).

A devida escolha do material deve ser considerada para compor o processo digital com a observância das propriedades biomecânicas na busca de uma ortodontia digital customizada (Hodecker et al., 2022; Larson et al., 2013).

3 PROPOSIÇÃO

O objetivo deste estudo foi o de comparar um novo braquete cerâmico fabricado por impressão 3D, com braquetes cerâmicos manufaturados por injeção de molde de cerâmica em um ensaio mecânico de resistência à torção pela aplicação de torque.

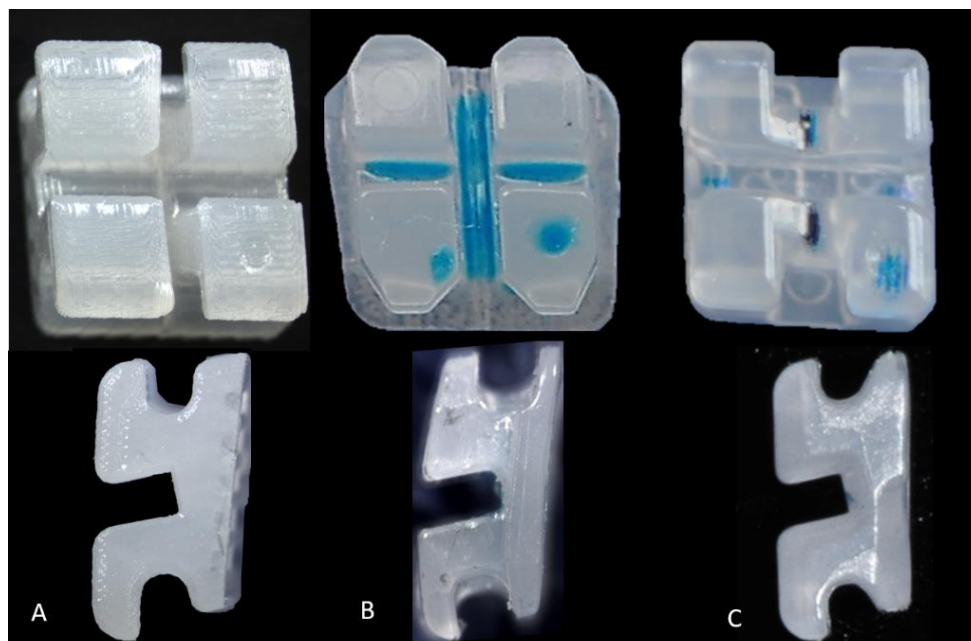
4 MATERIAL E MÉTODOS

Foram avaliados trinta braquetes cerâmicos convencionais de alumina policristalina de incisivo central superior direito de ranhura horizontal de 0,022 x 0,028 polegadas em três grupos (n=10) por condição de teste.

Conforme a Figura 1, o grupo A apresenta braquetes manufaturados por impressão 3D e prescrição customizada (+17° e *angulação* +5°) da Lightforce Clear (Lightforce Orthodontics System, Cambridge, Massachussts - EUA).

Os grupos B e C contam com braquetes manufaturados por injeção de cerâmica, da técnica MBT (+17 e *angulação* +4°) para o Clarity Advanced (3M Unitek, Monrovia, Califórnia -EUA) e para o GC Chic (GC Orthodontics, Illinois, Chicago – EUA).

Figura 1- Amostras de braquetes utilizadas na pesquisa em vista frontal e lateral



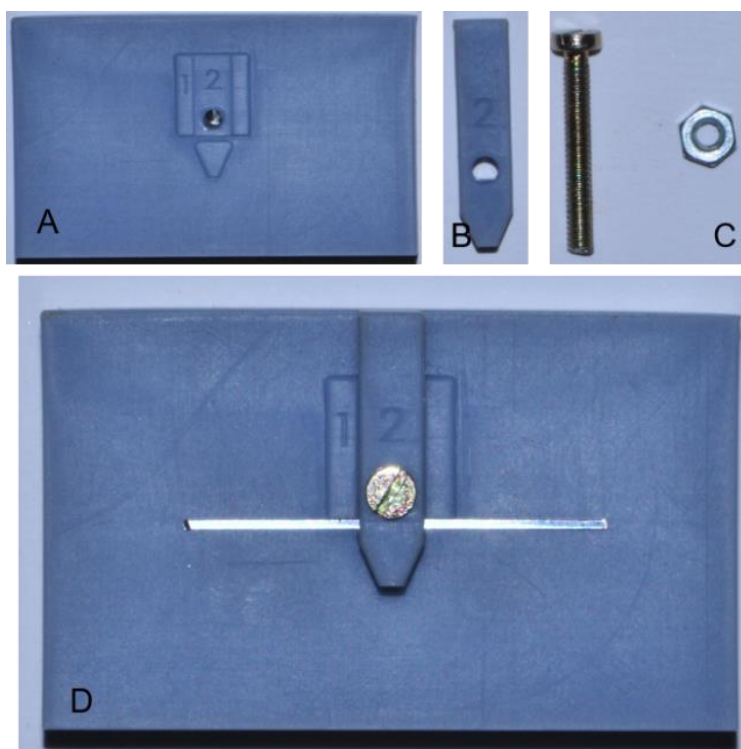
Legenda: a) *Lightforce Clear* ; b) *Clarity Advance* ; c) *GC Chic* .
Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram utilizados fios de aço inoxidável 0,019 x 0,025 polegadas (GAC® , Dentsply Sirona, Nova Iorque, EUA), preparados em sete templates, impressos em 3D em resina para a dobra dos fios de aço, composto de base-1, âncora-2, dobrador-3, base-4, âncora-5, dobrador-6 e âncora-7.

4.1 Preparação do fio

Foi utilizado um fio reto de aço inoxidável de 0,019 x 0,025 polegadas de 30 mm de comprimento posicionado no gabarito de dobra de fio base-1. O fio foi encaixado entre os dois blocos, certificando-se que estivesse nivelado e que a dimensão de 0,025 polegadas estivesse entre os blocos. A âncora-2 foi aparafusada (parafuso M2 e porcas correspondentes), para garantir que o fio não se movesse/girasse. (Figura 2).

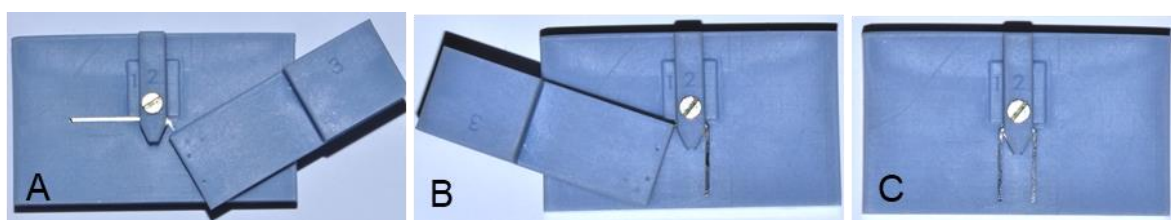
Figura 2 - Arco reto preso na base-1 pela âncora 2



Legenda: a) base-1; b) âncora 2; c) parafuso M2; d) fio preso na base-1.
Fonte: Elaborada pelo autor.

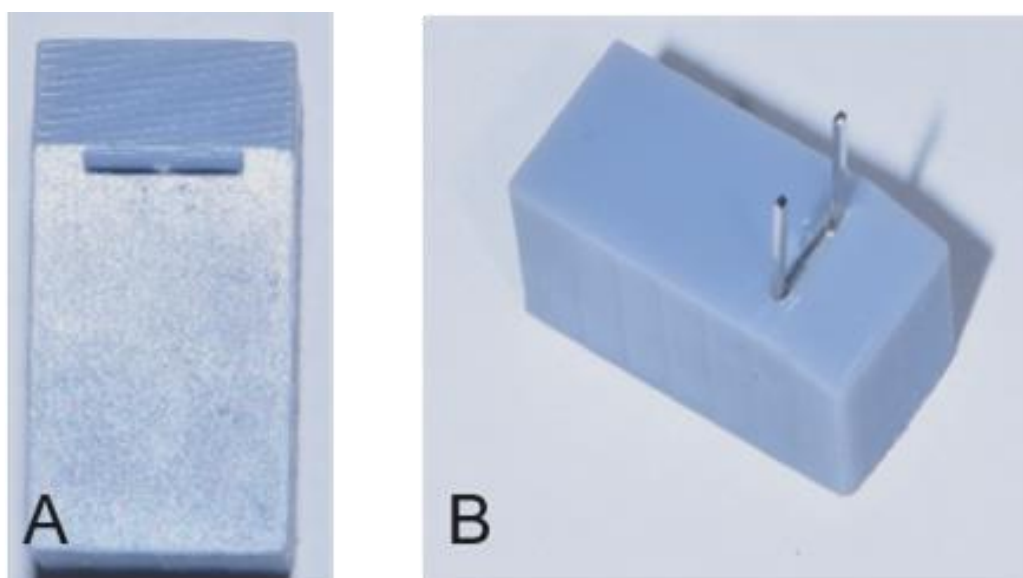
Cada fio reto foi empurrado para dentro do bloco com o dobrador-3 formando um U a fim de dobrar os fios de forma a ficarem paralelos entre si (Figura 3). Certificou-se de que o recorte do fio estivesse contra o fio e a base enquanto dobrasse, o que garantiu que o fio permanecesse plano. O fio do gabarito foi removido e passado para o bloco-4 (Figura 4).

Figura 3 - Dobrador-3



Legenda: Mostra a dobra do fio a) dobra A; dobra B; dobra C.
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4- Fio em forma de U preso na base-4 pela âncora-5

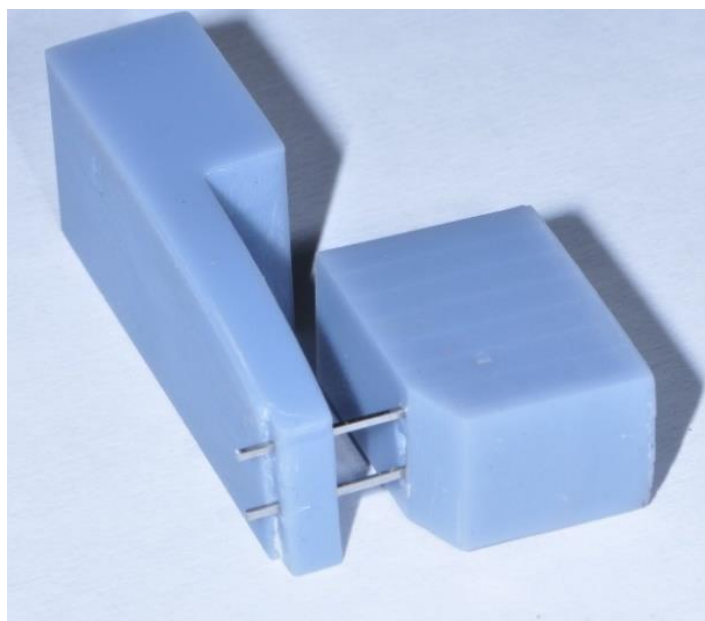


Legenda: a) âncora-5; b) fio em forma de U encaixado na âncora-5.
Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o dobrador-3 empurrou-se a seção de fio reto, ambos os fios, no bloco formando uma dobra de 90 graus. Certificou-se de que o fio passasse pelos dois

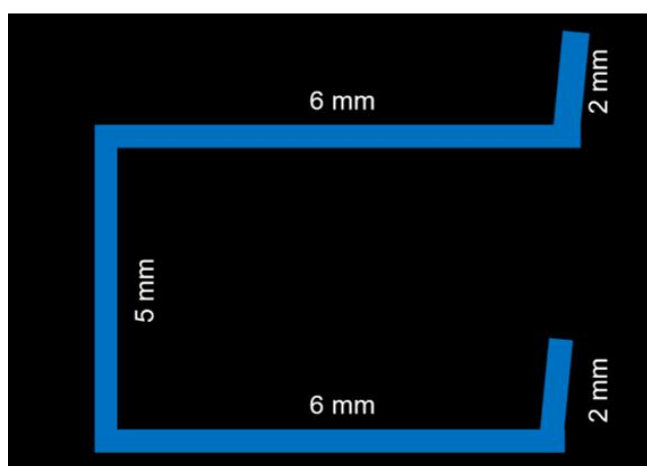
orifícios, o que garantiu que o fio permanecesse no plano (Figura 5). Após estas dobras foi cortado o excesso de fio, deixando 2 mm de altura em suas extremidades (Figura 6).

Figura 5- Dobrador preso no arco em forma de U



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 - Esquema de flexão do fio do arco de aplicação de torção e o resultado (fio dobrado)



Legenda: a) desenho esquemático das dobras do fio; b) fio configurado para o teste
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Preparação do suporte, bráquete, fio e fixação

No suporte de fixação foi realizada uma perfuração com fresa Maxicut Tungstênio (Edenta 1517 PM, Hauptstrasse, Suíça) e preenchida com resina acrílica ativada quimicamente Jet (Clássico Artigos Odontológicos, São Paulo, SP, Brasil) na fase arenosa, proporcionada e preparada de acordo com as recomendações do fabricante.

Após a polimerização e regularização da superfície com lixas abrasivas de carbeto de silício de granulação #220 (Norton S.A., São Paulo, SP, Brasil), os braquetes foram fixados na superfície do suporte de teste de torque na região preenchida com a resina, utilizando cianoacrilato (Super Bonder, Loctite, São Bernardo do Campo, SP, Brasil), na observância de manter todos braquetes da amostra na mesma angulação.

Após a secagem, os segmentos de arco foram fixados aos braquetes com ligadura elastomérica individual de 0,012 polegadas (Ormco, Alemanha) ligando assim o fio em forma de U à amostra do bráquete (Figura 7).

Figura 7 – Preparação do suporte, braquete, fio e fixação



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Preparação do Sistema de Máquina de Ensaio Universal

Posicionou-se a amostra do arco e o suporte no acessório de teste de torque, com as dobras do arco perpendiculares (para cima) e aletas gengivais em direção à base (Figura 8).

Colocou-se o dispositivo de teste e o conjunto de espécime no dispositivo de fixação com base em tração da máquina de ensaio universal (EMIC, DL-1000, São José dos Pinhais/PR, Brasil).

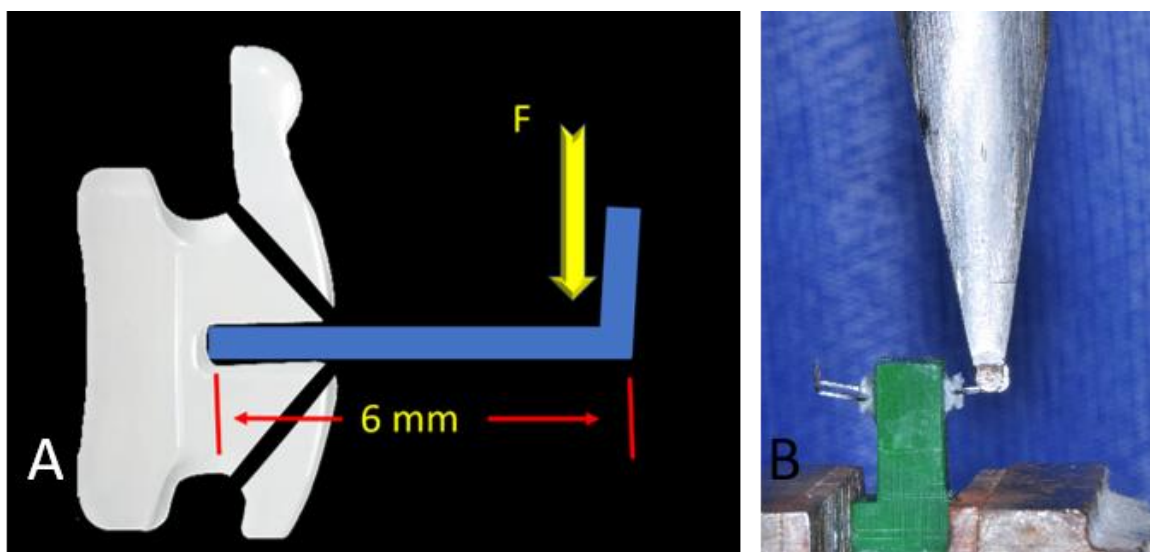
Figura 8 - Amostra de fio / suporte no acessório de teste de torque



Fonte: Elaborada pelo autor.

Apoiou-se a ponta de ação no acessório de fixação da EMIC com centralizada sobre o fio em suas dobras verticais (6 mm de distância do zero da ranhura do suporte, considerada a distância interbraquetes). Foi movida lentamente e cuidadosamente empurrada para baixo, com a ponta para baixo em direção à amostra, permitindo que a ponta fizesse contato, mas aplicando força zero com o fio no ponto onde ele se dobrava (Figuras 8 e 9).

Figura 9 – Desenho esquemático e configurações para aplicação do torque



Legenda: a) desenho esquemático para aplicação de torque; b) configuração na EMIC para aplicação de torque.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 Aplicação do teste

A máquina universal de ensaio (EMIC), através da ponteira, empurrou o fio de aço 0,019 x 0,025 polegadas nas dobras verticais construídas nas pontas do U, onde a ponteira fez seu apoio simulando um torque vestibular de raiz.

O teste de resistência torcional foi realizado com uma célula de carga de 1000 kg a uma velocidade de 1,0 mm/min. Iniciou-se o movimento até que ocorresse a fratura das aletas do braquete.

O valor de pico de carga foi registrado considerando como força (N) necessária para fraturar as aletas. O torque (N) foi tomado como a força (N) multiplicada pela distância (mm) entre a placa e o slot zero do braquete (6 mm).

4.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise descritiva e inferencial pelos programas computacionais MINITAB (Minitab, versão 2017) e GraphPad PRISM (Prism versão 9.1.0, 2021).

A estatística descritiva dos dados consistiu nas medidas de: tendência central (média e mediana) e, ainda, com os valores de dispersão (desvio padrão, mínimo e máximo, coeficiente de variação e faixa interquartil); e tiveram representação gráfica com os gráficos de colunas (media $\pm$ desvio padrão) e o esquema dos cinco números (*Box-Plot*).

Para a aplicação do modelo robusto da ANOVA, em uma abordagem paramétrica, foi levado em consideração o requisito de homoscedasticidade, a homogeneidade de variância.

A estatística inferencial consistiu no teste de análise de variância ANOVA, 1 fator, que estabelece como hipótese nula que todas as médias das amostras como iguais e como hipótese alternativa que pelo menos uma das médias difira na aplicação do método de Games-Howell Pairwise Comparisons. O nível de significância adotado foi o valor de 5%.

5 RESULTADO

Os valores de resistência à aplicação de torques obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) podem ser observados nos três grupos de bráquetes do estudo, conforme Tabela 1. A estatística descritiva dos valores apresenta-se na Tabela 2. A Figura 10 traz os valores de resistência à aplicação de torque obtidos em cada um dos grupos quanto à mediana de tendência central.

O grupo *Lightforce Clear* apresentou o maior valor mediano (14,21 N/mm) e o grupo *GC Chic* o menor (6,56 N/mm) e o grupo *Clarity* apresenta comportamento intermediário (12,08 N/mm), todavia, tendendo para o mais próximo do grupo *Lightforce Clear*.

Uma amostra testada do grupo *Lightforce Clear*, que apresentou um valor discrepante da média, 21,05 N/mm, e foi sinalizada com “●”. Quanto à medida tendência central média, Figura 11, o grupo *Lightforce Clear* ($14,53 \pm 2,85$) apresenta uma superioridade e o grupo *GC Chic* ($6,65 \pm 0,35$) apresenta inferioridade frente aos demais grupos.

Em relação à variabilidade dos dados observa-se uma pequena diferença de comportamento entre os grupos *Lightforce Clear* e *Clarity*, com maior dispersão relativa de ruptura das aletas do braquete para os grupos *Clarity* (20,30 %) e grupo *Lightforce Clear* (19,62 %) em relação ao grupo *GC Chic* (5,33 %).

Tabela 1- Valores de resistência à aplicação de torque, obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) nos três grupos de braquetes (*Lightforce Clear*, *Clarity* e *GC Chic*)

Ligttforce Clear	Clarity	GC CHIC
12,43	14,90	6,99
14,10	11,13	6,37
11,12	8,66	6,44
16,16	11,00	6,23
15,39	12,27	6,35
14,32	7,91	6,82
21,05	13,49	7,29
13,79	14,21	6,37
15,54	14,92	6,69
11,45	11,89	6,98

Fonte: Elaborada pelo autor.

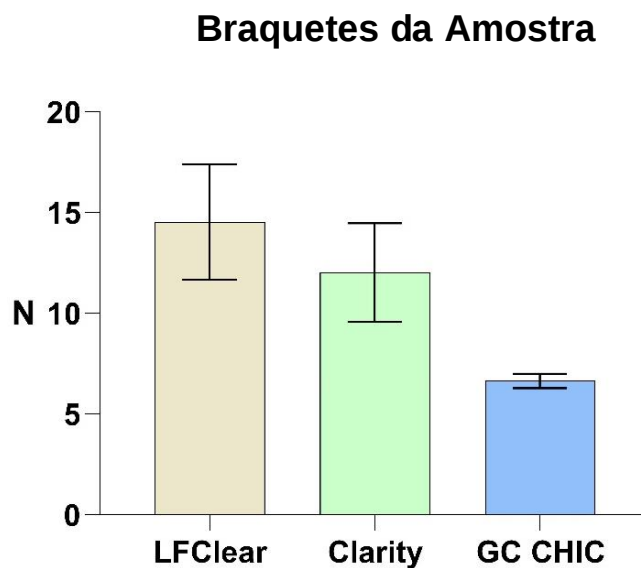
Tabela 2- Estatística descritiva dos valores de resistência à aplicação de torque, obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) nos três grupos de braquetes (*Lightforce Clear*, *Clarity* e *GC Chic*)

Variável	n	Média	Desvio Padrão	CoefVar	Mínimo	Máximo
Lightforce Clear	10	14,53	2,85	19,62	11,12	21,05
Clarity	10	12,03	2,44	20,30	7,91	14,92
GC CHIC	10	6,65	0,35	5,33	6,23	7,29

Variável	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Lightforce Clear	11,12	12,18	14,21	15,69	21,05
Clarity	7,91	10,41	12,08	14,38	14,92
GC CHIC	6,23	6,36	6,56	6,98	7,29

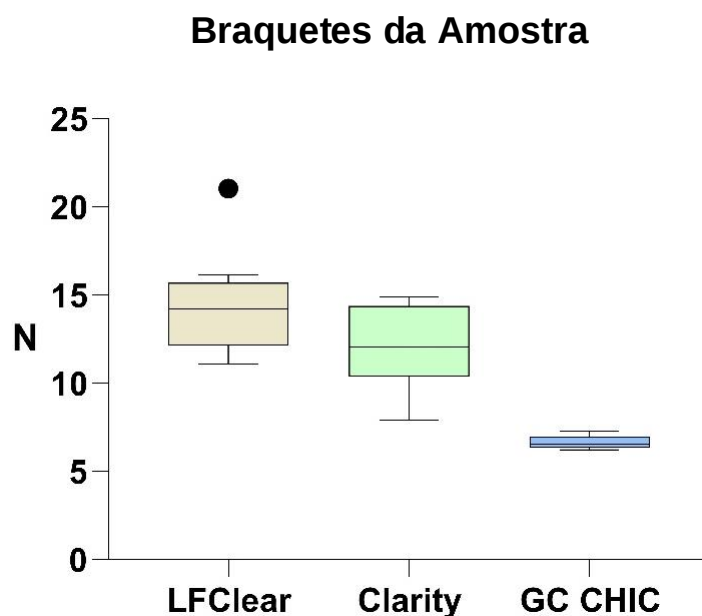
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 - Gráfico de coluna (média $\pm$ desvio padrão) com os valores de resistência à aplicação de torque, obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) nos três grupos de braquetes



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 11 - Esquema dos cinco números (*Box and Whisker Plot*) dos dados de valores de resistência à aplicação de torque, obtidos no ensaio de resistência à torção de carga máxima de fratura (N) segundo os três grupos de braquetes



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para avaliar a influência dos três tipos de braquetes na aplicação de torque (dobras de 3ª ordem), obtidos no ensaio de resistência à torção os dados obtidos foram submetidos ao modelo estatístico da análise de variância (ANOVA), fator 1.

Observou-se uma diferença estatística entre os três grupos testados ($p < 0,05$) após ser considerada a distribuição dos resíduos. A comparação das médias foi realizada pelo Teste de Welch indicado pelo programa Minitab, uma vez que o desvio padrão difere entre os três grupos (Tabela 3).

O Método de Games-Howell foi realizado (Tabela 4), demonstrando a diferença estatística entre o grupo *GC Chic* ($6,65 \pm 0,35$) e os dois outros grupos: *Lightforce Clear* ($14,53 \pm 2,85$) e *Clarity* ($12,03 \pm 2,44$); porém não houve diferença entre os grupos *Lightforce Clear* e o grupo *Clarity*.

Tabela 3- Resultado análise de variância ANOVA (1 Fator) para os dados de resistência à aplicação de torque (N.mm)

Efeito	GL	SQ	MQ	F	p*
Fator (bráquetes)	2	325	162	34,20	0,00
Resíduo)	27	128	5		
Total	29	453			

* $p < 0,05$.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4- Formação dos grupos homogêneos (conjuntos de mesmo desempenho) quanto aos valores (N/mm) à resistência na aplicação de torque assim como a média e desvio padrão, após à aplicação do método de Games-Howell

Marcas Comerciais	Média $\pm$ Desvio Padrão	Grupos Homogêneos*
Lightforce Clear	14,53 $\pm$ 2,85	A
Clarity	12,03 $\pm$ 2,44	A
GC Chic	6,65 $\pm$ 0,35	B

* Letras maiúsculas distintas nas colunas representam diferenças significativas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

6 DISCUSSÃO

Este estudo foi desenhado para avaliar a resistência de braquetes cerâmicos fabricados por impressão 3D, por manufatura aditiva, no que tange à sua resistência diante da expressão de torque em comparação aos braquetes convencionais cerâmicos injetados.

Esse processo consolida uma das etapas de suma importância na mecânica ortodôntica para o posicionamento mais certo das raízes dentárias gerenciando longevidade pós-tratamento; no entanto, confrontar os resultados obtidos com a literatura atual torna-se uma tarefa difícil diante da escassez de trabalhos envolvendo braquetes cerâmicos impressos 3D.

Ressalta-se, todavia, que outros autores realizaram pesquisas em resistência ao torque em diversos tipos de braquetes, como braquetes metálicos de policarbonatos com ou sem ranhura metálicas e cerâmicos injetados monocristalinos e policristalinos, atuando com metodologias bem próximas a deste estudo (Holt et al., 1991; Kieling et al., 2018; Kreyer., 2016; Manhães et al., 2011; Nishio et al., 2009).

A capacidade de suportar uma qualidade da expressão de torque em braquetes cerâmicos sem que ocorra a fratura de suas aletas tem sido desafiadora na ortodontia (Alkire et al., 1997; Chen et al., 2007; Johnson et al., 2005) (Morina et al., 2008).

O risco de viés torna-se grande ao se considerar alguns fatores de direta influência na manufatura dos braquetes cerâmicos nesta etapa de expressão de torques uma vez que componentes cerâmicos apresentam alta fragilidade, alta resistência ao atrito e maior suscetibilidade a fraturas apesar da vantagem estética aprimorada (Araújo et al., 2012; Johnson et al., 2005; Sobreira et al., 2007; Vhanbatte et al., 2014).

Neste estudo buscou-se utilizar braquetes convencionais de cerâmica policristalina, com a mesma prescrição de torque e angulação utilizada para incisivos centrais superiores direitos: um grupo de braquete customizados impressos em 3D por manufatura aditiva (Lightforce Clear) e dois grupos de braquetes convencionais (Clarity e GC Chic) manufaturados por injeção de molde de cerâmica na prescrição MBT disponíveis comercialmente e mencionados em diversos estudos da literatura

científica (Holt et al., 1991; Kielink et al., 2018; Khanapure et al., 2016; Lee et al., 2016; Manhães et al., 2011; Martelli et al., 2019; Nishio et al., 2009;).

Foram utilizados fios de aço inoxidável, pois é a rigidez do material (arco) que vai determinar a leitura completa das informações dos braquetes. Ligas de níquel-titânio e titânio-molibdênio apresentam menor rigidez, o que leva a uma leitura menor do torque (Lacarbonara et al., 2015).

Nishio et al. (2018) e Vhanbatte et al. (2014), em suas investigações, não encontraram correlação entre as dimensões dos braquetes e a resistência à fratura e, ainda, que a fratura do braquete no momento do torque pode ser devido ao excesso de força incorporada durante a torção do fio e não devido à falta de resistência do braquete (Manhães et al., 2011).

Em contraste, os estudos de Martelli et al. (2019), verificaram que a altura da ranhura horizontal está diretamente relacionada à expressão de torque e ao ângulo de torção do fio.

No presente ensaio mecânico foi observado que houve diferença estatística entre os três grupos testados em relação ao desvio padrão, que difere entre os três grupos.

Nos braquetes envolvidos no estudo (Figura1), houve uma diferença estatística entre o grupo GC Chic ($6,65 \pm 0,35$) e os dois outros grupos: Lightforce Clear ($14,53 \pm 2,85$) e Clarity ($12,03 \pm 2,44$), porém não houve uma diferença significativa entre o Lightforce Clear e o Carity, que apresentou comportamento intermediário, tendendo para o mais próximo do grupo Lightforce Clear (Tabela 4). Foi observado também (Figura 1), que o mínimo de força aplicada no ensaio para quebrar as aletas do Lightforce Clear (11,12 N) foi quase o dobro de aplicação de força para a fratura das aletas do GC Chic (6,23 N).

Diferenças entre os valores mínimos de resistência à aplicação de torque na análise estatística descritiva foram também revelados neste estudo entre os grupos de braquetes envolvidos, no qual o grupo Ligthforce Clear (11,12N) , o grupo Clarity (7,91N) e o grupo GC Chic (6,23N), descritos na Tabela 2.

Apesar das diferenças, os resultados indicaram que os braquetes cerâmicos deste estudo, em particular, nos braquetes cerâmicos Lightforce Clear customizados impressos 3D, mostrou-se comportamento maior de resistência à fratura para incorporar o torque do incisivo central superior (Tabela 1).

Outrossim, o local da fratura do braquete e a angulação do arco não foram verificados durante o ensaio mecânico, como também os aspectos microestruturais dos braquetes deste estudo. Seus perfis de fratura devem ser abordados por análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) que devem compor em estudos complementares.

Nesta investigação *in vitro* os resultados devem ser vistos com cautela porque os testes de laboratório não podem modelar exatamente as situações clínicas. Devem ser considerados as suas limitações, uma vez que o alcance dos resultados também fica diretamente limitado as fraturas decorrentes dos torques, bem como à fatores intraorais que podem afetar à resistência ao torque: área de superfície radicular, ação salivar, corrosão, biofilme, densidade óssea, número de dentes, mastigação, configuração anatômica e oclusão. (Ajami et al., 2018; Johnson et al., 2005; Nishio et al., 2018).

O efeito do pH, enzimas e microrganismos orais na estabilidade dos braquetes ainda são desconhecidos (Khanapure et al., 2016).

Apesar de não ser objeto direto deste estudo, muitos autores correlacionam a variabilidade da dimensão dos slots em braquetes cerâmicos com a capacidade de expressão dos torques como também a questão da menor percepção visual dos braquetes cerâmicos. Estudos anteriores, referente a este assunto, apontam a variabilidade do tamanho dos slots em braquetes ortodônticos em suas dimensões, e a precisão das informações incorporadas aos braquetes é fator determinante para a eficácia do movimento de torque aos elementos dentais. (Arreghini et al., 2014; Lacarbonara et al., 2015; Lee et al., 2016; Lefebvre et al., 2019).

Nos estudos de Lefebvre et al. (2019), mostraram que em uma grande proporção de braquetes aferidos existiam imprecisões dimensionais quando comparados aos valores declarados pelos fabricantes, o que muitas vezes cria um jogo torcional excessivo com expressão de torque não controlada levando a um comprometimento do desfecho clínico.

Nos trabalhos de Lee et al. (2016), também foram relatadas diferenças no tamanho dos slots. Um estudo sobre precisão dimensional em braquetes autoligantes cerâmicos, o qual levou em consideração também as dimensões dos arcos ortodônticos de secção retangular, entretanto, a folga do arco dentro do slot é multifatorial e pode apontar o modo de ligadura, o tipo de material do braquete ou

ainda imprecisões estruturais (Lefebvre et al., 2019).

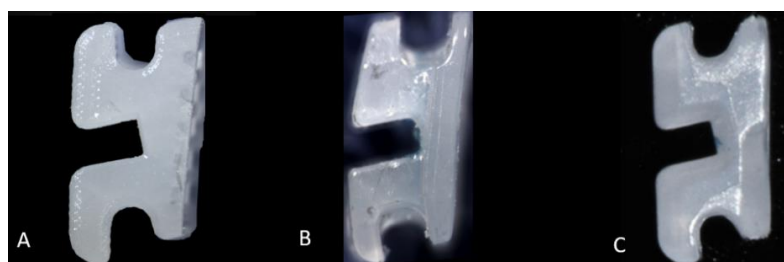
Nos estudos de Lacarbonara et al. (2015), a combinação entre o encaixe do fio ortodôntico dentro do slot do braquete abre uma discussão sobre a discrepância entre as informações fornecidas pelo fabricante e a real interação entre slot e fio ortodôntico. Mesmo quando são utilizados braquetes e arcos de dimensões nominalmente idênticas, pode haver grande variação nos ângulos de folga e torque devido a imprecisão dimensional desses produtos (Arreghini et al., 2014).

Uma limitada análise das amostras deste estudo foi realizada em estereomicroscopia (Discovery.V20 Zeiss, Suíça) para verificar as dimensões dos slots dos braquetes (profundidade e altura dos slots), uma vez que essas dimensões poderiam afetar a resistência à fratura por força de torção.

Nesta leitura foram reconhecidos valores aceitáveis, embora com pequenas alterações dimensionais, porém próximos dos indicados pelos fabricantes. A diferença entre as larguras dos braquetes não era tão evidente.

Uma limitação do estudo foi a não mensuração do jogo torcional entre arco e a ranhura horizontal dentro das amostras; no entanto, quando a arco preenche a ranhura horizontal e entra em contato com o sistema de amarração, a folga a ranhura horizontal do braquete é reduzida a depender diretamente do tipo de amarração e da profundidade desta ranhura. (Ajami, Boroujeni, 2018).

Figura 12- Visualização da dimensão dos slots nos braquetes da amostra



Legenda: a) Lightforce Clear; b) Clarity c) GC Chic
Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste estudo, foram utilizadas ligaduras elastoméricas individuais para a amarração do arco nos braquetes. Ademais, os arcos foram de aço inoxidável da mesma marca e calibre (0,019 x 0,025 de polegadas) em todas as amostras, o que

resulta em maior rigidez, portanto, uma maior e melhor leitura da expressão de torque, sendo que todos os braquetes das amostras apresentaram as mesmas dimensões de 0,022 x 0,028 polegadas.

Um outro fator que requer uma breve citação, apesar de não compor a temática do estudo, é a grande demanda dos pacientes na busca de uma ortodontia com uma menor percepção visual tem levado o mercado a buscar novas possibilidades em aparelhos ortodônticos dito estéticos. Neste contexto, os braquetes cerâmicos ganham destaque pela alta capacidade de não sofrer alterações de cor e maior beleza, contudo, suas propriedades mecânicas devem ser compreendidas dada a friabilidade da cerâmica e dureza. (Kumar et al., 2007; Lopes Filho., 2012; Sobreira et al., 2007).

Esses braquetes apresentam limitações clínicas, como maior fratura das aletas e maior dificuldade de remoção, podendo levar a desgastes de dentes naturais (Sobreira et al., 2007). O conhecimento clínico das propriedades e do comportamento clínico é imprescindível para o ortodontista, e também foi relatado nos estudos de Kumar et al. (2007).

Nas investigações de Lopes Filho et al. (2012) concluiu-se que as propriedades ópticas dos braquetes estéticos têm influência direta na percepção visual e, ainda, que os braquetes translúcidos, ou seja, os de cerâmica monocristalina, apresentaram melhor comportamento quanto à aparência; no entanto, braquetes monocristalinos ou policristalinos apresentam boa estabilidade de cor.

Em contraste, os estudos de Yu e Lee (2011) relataram que a alta translucidez por si só não levou a um bom desempenho estético e que tal desempenho foi influenciado pela marca do braquete, o que significa que braquetes da mesma composição, feitos por fabricantes diferentes, apresentaram desempenhos estéticos de cores diferentes.

Nos estudos de Shibani et al. (2020) foi comparada a ação de duas bebidas corantes em braquetes cerâmicos e os resultados do espectrofotômetro mostraram alterações de cor dentro dos valores de referência para faixa clinicamente aceitável.

Haynie et al. (2021), em seus trabalhos, verificaram a estabilidade de cor em braquetes ortodônticos de resina impressos em 3D em vista de um sistema customizado, no qual essa personalização da forma e prescrição do braquete, bem como a facilidade de posicionamento ideal podem levar a uma maior eficiência com o mínimo de dobras de na fase final do tratamento, todavia as resinas investigadas em

seus estudos não suportaram o uso em aplicações de braquetes estéticos impressos 3D.

Neste estudo, os braquetes customizados impressos 3D foram manufaturados em cerâmica policristalina, ou seja, não translúcida, acompanhando a maioria dos braquetes presentes no mercado dado o menor custo de manufatura; conquanto, atende à questão relacionada a menor percepção visual exigida pelos pacientes, levando a uma atratividade facial e, conseqüentemente, melhoria nas interações sociais.

Os emergentes avanços tecnológicos para uma ortodontia de precisão têm instigado os profissionais a buscar o entendimento e a incorporação desses recursos tecnológicos na sua clínica diária. Tendo em vista à melhoria dos resultados em seus pacientes, vinculada à busca de um tratamento ortodôntico de precisão. É necessária então, a cooperação entre os interesses do ortodontista e os das empresas de tecnologia (Panayi, Tsolakis, 2021).

Varredura intraoral, tomografia computadorizada, impressão 3D, desenho e fabricação assistida por computador (CAD/CAM) apresentam-se na vanguarda dessa nova e promissora ortodontia digital (Jheon et al., 2017; Kreya et al., 2016; Nguyen et al., 2018).

Os avanços da produção de braquetes ortodônticos através manufatura aditiva tornam-se um processo com redução de tempo e limita o erro humano, dado o menor número de etapas no processo, diminuindo o impacto ambiental com redução do desperdício de material e consumo de energia (Galante et al., 2019; Scheithauer et al., 2017).

As tecnologias digitais ganham destaque no cenário atual da ortodontia com um futuro auspicioso em vista da manufatura de aparelhos ortodônticos customizados impressos, além de permitirem a utilização de software de planejamento virtual, otimizando os resultados; não obstante, informações adicionais devem ser inseridas para apoiar e validar a utilização dessas tecnologias digitais no campo da ortodontia (Hodecker et al., 2022; Nguyen, Jackson, 2018; Panayi, Tsolakis, 2021).

Nesta investigação essa tecnologia de precisão foi absorvida, uma vez que os braquetes cerâmicos customizados impressos 3D por manufatura aditiva são objetos do estudo. Buscou-se verificar se suportam a expressão de torque exigida na mecanoterapia ortodôntica, braquetes e gabaritos de colagem personalizados, com

torque específico e pré-tratamento computacional auxiliado pelo sistema CAD/CAM, além de atratividade visual.

Esses são requisitos na melhoria da reprodutividade, eficiência e qualidade dos resultados ortodônticos (Brown et al., 2015; Penning et al., 2017) e a partir desta linha de ideias e tentativas, novas pesquisas laboratoriais e clínicas são necessárias para que novas investigações com braquetes impressos 3D em cerâmica sejam detectados e/ou aprimorados.

Apesar de este estudo apresentar bons resultados nas utilizações desse sistema de manufatura aditiva de braquetes cerâmicos customizados impressos 3D, estudos porvir podem aprimorar suas utilizações na ortodontia para que, não somente a expressão dos torques sejam suportadas, mas também a resolução de outras necessidades exigidas durante a biomecânica ortodôntica, como a questão do atrito e tensão de cisalhamento seja mais efetiva.

Acredita-se que a ortodontia digital de precisão ainda tem infindáveis possibilidades de gerir informações e meios de avançar na resolução das deficiências do sistema e espera-se que, de alguma forma, o presente trabalho tenha contribuído para trazer mais informações sobre o tema e para o avanço da ciência.

É necessário, contudo, avançar nas pesquisas de materiais para investigar a capacidade de torque, o gerenciamento do atrito, a capacidade de cisalhamento e a estabilidade da fratura no desenvolvimento desses braquetes cerâmicos fabricados por impressão 3D por manufatura aditiva no sentido de aprimorar sua performance, na busca de um tratamento ortodôntico customizado ideal, eficiente, seguro e reprodutível dentro da nova ortodontia digital de precisão. Nessa conjunção, a ciência nunca deve ser deixada de lado, já que futuros frutos dependem de trabalhos e esforços em todas as esferas do conhecimento.

7 CONCLUSÃO

Após a realização deste estudo pode-se concluir que os braquetes cerâmicos *Lightforce Clear* impressos 3D customizados são mais resistentes que os injetados e apontam como uma alternativa factível e promissora em busca de uma ortodontia digital de precisão.

REFERÊNCIAS

Ajami S, Boroujeni AR. Impact of different rectangular wires on torsional expression of different sizes of buccal tube. *J Clin Exp Dent*. 2018;10(1):e25–31. doi: 10.4317/jced.54300.

Ajith S, Gowda A, Babaji P, Shivaprakash S, Dmello K, Kamble S. An in vitro comparison of resistance to second and third order archwire activations of three different varieties of esthetic brackets. *Indian J Dent Res*. 2013;24(6):701–7. doi: 10.4103/0970-9290.127615. PMID: 24552930.

Aknin PC, Nanda RS, Duncanson MG, Currier GF, Sinha PK. Fracture strength of ceramic brackets during arch wire torsion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1996;109(1):22–7. doi: 10.1016/S0889-5406(96)70159-2. PMID: 8540476.

Alkire RG, Bagby MD, Gladwin MA, Kim H. Torsional creep of polycarbonate orthodontic brackets. *Dent Mater*. 1997;13(1):2–6. doi: 10.1016/S0109-5641(97)80001-2. PMID: 9467316.

Alrejaye N, Pober R, Giordano R. Torsional strength of computer-aided design/computer-aided manufacturing-fabricated esthetic orthodontic brackets. *Angle Orthod*. 2017;87(1):125–30. doi: 10.2319/040416-267.1. PMID: 27403781.

Araújo MD, Grande RHM, Yoshimura HN. Microestrutura e propriedades mecânicas de braquetes cerâmicos. *J Biodentistry Biomater*. 2013;3:11-26.

Arreghini A, Lombardo L, Mollica F, Siciliani G. Torque expression capacity of 0.018 and 0.022 bracket slots by changing archwire material and cross section. *Stat Pap*. 2014;15(1):1–18. doi: 10.1186/s40510-014-0053-x. PMID: 25329505.

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 Dentofac Orthop*. 2015;148(6):1067–74. doi: 10.1016/j.ajodo.2015.07.029. PMID: 26672713.

Chen HY, Su MZ, Chang HFF, Chen YJ, Lan WH, Lin CP. Effects of different debonding techniques on the debonding forces and failure modes of ceramic brackets in simulated clinical set-ups. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2007;132(5):680–6. doi: 10.1016/j.ajodo.2006.01.035. PMID: 18005844.

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

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

Haynie AS, English JD, Paravina RD, Moon A, Hanigan J, Abu Al Tamn MA, et al. Colour stability of 3D-printed resin orthodontic brackets. *J Orthod*. 2021;48(3):241–9. doi: 10.1177/14653125211001079. PMID: 33719707.

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. doi: 10.1007/s00784-022-04373-5.

Holt MH, Nanda RS, Duncanson MG. Fracture resistance of ceramic brackets during arch wire torsion. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 1991;99(4):287–93. doi: 10.1016/0889-5406(91)70010-T. PMID: 2008887.

Jheon AH, Oberoi S, Solem RC, Kapila S. Moving towards precision orthodontics: An evolving paradigm shift in the planning and delivery of customized orthodontic therapy. *Orthod Craniofac Res*. 2017;20(March):106–13. doi: 10.1111/ocr.12171. PMID: 28643930. 29

Johnson G, Walker MP, Kula K. Fracture strength of ceramic bracket tie wings subjected to tension. *Angle Orthod*. 2005 Jan;75(1):95-100. doi: 10.1043/0003-3219(2005) 075<0095:FSOCBT>2.0.CO;2. PMID: 15747822.

Karamouzos A, Athanasiou AE, Papadopoulos MA. Clinical characteristics and properties of ceramic brackets: A comprehensive review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1997;112(1):34–40. doi: 10.1016/S0889-5406(97)70271-3. PMID: 9228839.

Khanapure CC, Ayesha S, Sam G, Anil Kumar VJ, Deepika C, Ahmed H. Evaluation of different bracket's resistance to torsional forces from archwire. *J Contemp Dent Pract*. 2016;17(7):564–7. doi: 10.5005/jp-journals-10024-1890. PMID: 27595723.

Kieling TCB, Sobrinho LC, Godoi APT, Menezes CC, Veneziani GC, Costa AR. Fracture strength of monocrystalline and polycrystalline ceramic brackets during archwire torque. *Rev Odontol Da UNESP*. 2019;48:1–7. doi: 10.1590/1807-2577.04819.

Kreya K, Darkazanlyb N, Kühnere R, Ruged S. Dreidimensional gedruckte kieferorthopädische Brackets – eine Machbarkeitsstudie. *Int J Comput Dent* 2016;19(4):351–62.

Kumar Jena, AD. Physical properties and clinical characteristics of ceramic bracket: a comprehensive review. *Trends Biomater. Artif Organs*. 2007;20(2):50–66.

Lacarbonara M, Accivile E, Abed MR, Dinoi MT, Monaco A, Marzo G, et al. Variable torque prescription: state of art. *Open Dent J*. 2015;9:60–4.

Larson BE, Vaubel CJ, Grünheid T. Effectiveness of computer-assisted orthodontic treatment technology to achieve predicted outcomes. *Angle Orthod*. 2013;83(4):557–62. doi: 10.2319/080612-635.1. PMID: 23181776.

Lee JY, An J, Chua CK. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Appl Mater Today*. 2017;7:120–33. doi: 10.1016/j.apmt.2017.02.004.

Lee Y, Lee DY, Kim YJR. Dimensional accuracy of ceramic self-ligating brackets and estimates of theoretical torsional play. *Angle Orthod*. 2016;86(5):804–9. doi: 10.2319/092415-647.1. PMID: 26756375.

Lefebvre C, Saadaoui H, Olive JM, Renaudin S, Jordana F. Variability of slot size in orthodontic brackets. *Clin Exp Dent Res*. 2019;5(5):528–33. doi: 10.1002/cre2.219. PMID: 31687187.

Lopes Filho H, Maia LEG, Araújo MVA, Ruellas ACO. Influence of optical properties of esthetic brackets (color, translucence, and fluorescence) on visual perception. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2012;141(4):460–7. doi: 10.1016/j.ajodo.2011.10.026. PMID: 22464528.

Manhães RF, Divino R, Lucato AS, Vedovello SAS, Correa C, Valdrigh HC. Fracture strength of ceramic brackets submitted to archwire torsional strain. *Braz J Oral Sci*. 2011;10(3):180–3. doi: 10.20396/bjos.v10i3.8641626.

Martelli K, Freitas KMS, Negreiros P de O, Janson G, Cançado RH, Valarelli FP, et al. Comparison of torque expression in esthetic brackets. *J Clin Exp Dent*. 2019;11(9):e783–9. doi: 10.4317/jced.56102.

Morina E, Eliades T, Pandis N, Jäger A, Bourauel C. Torque expression of self-ligating brackets compared with conventional metallic, ceramic, and plastic brackets. *Eur J Orthod*. 2008;30(3):233–8. doi: 10.1093/ejo/cjn005. PMID: 18540011.

Nguyen T, Jackson T. 3D technologies for precision in orthodontics. *Semin Orthod*. 2018;24(4):386–92. doi: 10.1053/j.sodo.2018.10.003.

Nishio C, Mendes A de M, de Oliveira Almeida MA, Tanaka E, Tanne K, Elias CN. Evaluation of esthetic brackets' resistance to torsional forces from the archwire. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2009;135(1):42–8. doi: 10.1016/j.ajodo.2007.04.036. PMID: 19121499. 30

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;1(3):187–93. doi: 10.1016/j.xaor.2021.07.001.

Papageorgiou SN, Keilig L, Vandevska-Radunovic V, Eliades T, Bourauel C. Torque differences due to the material variation of the orthodontic appliance: a finite element study. *Prog Orthod*. 2017;18(1):4–11. doi: 10.1186/s40510-017-0161-5. PMID: 28164256.

Penning EW, Peerlings RHJ, Govers JDM, Rischen RJ, Zinad K, Bronkhorst EM, et al. Orthodontics with customized versus noncustomized appliances: a randomized controlled clinical trial. *J Dent Res*. 2017;96(13):1498–504. doi:

10.1177/0022034517720913. PMID: 28742420.

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*. 2018;27(1):14–20. doi: 10.1007/s11665-017-2843-z.

Shibani AM, Shamaa MS, Montasser MA. Colour change of ceramic brackets with the use of coloured beverages in adolescent patients: a randomized clinical trial. *Int Orthod*. 2020;18(2):340–8. doi: 10.1016/j.ortho.2020.02.002. PMID: 32147329.

Sobreira CR, Loriato LB, Oliveira DD. Braquetes estéticos: características e comportamento clínico. *Rev Clín Ortod Dent Press*. 2007;6(4):50–7.

Vhanbatte RS, Uddanwadiker RV, Patil P. Evaluation of torsional strength of ceramic brackets produced by arch wire twisting moment " *Int J Mech Eng Robot*. 2014;2(4):33–7.

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 14;20(1):39. doi: 10.1186/s40510-019-0292-y. PMID: 31608421; PMCID: PMC6790353.

Yu B, Lee YK. Aesthetic colour performance of plastic and ceramic brackets- An in vitro study. *J Orthod*. 2011;38(3):167–74. doi: 10.1179/14653121141434. PMID: 21875990.