

Propriedades mecânicas dos alinhadores ortodônticos impressos de maneira direta em comparação com os alinhadores termoformados

Mechanical properties of direct-printed orthodontic aligners compared to thermoformed aligners

Propiedades mecánicas de los alineadores de ortodoncia impresos directamente en comparación con los alineadores termoformados

Recebido: 06/01/2025 | Revisado: 16/01/2025 | Aceitado: 16/01/2025 | Publicado: 21/01/2025

Laís Melyna da Silva Mendonça

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6447-4269>

Faculdade do Centro Oeste Paulista, Brasil

E-mail: laismelina@hotmail.com

Karly Victoria de Oliveira Capozzi Queiroga

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5555-6901>

Faculdade do Centro Oeste Paulista, Brasil

E-mail: victoriacapozzi@hotmail.com

Emilly Alves da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8080-6175>

Faculdade do Centro Oeste Paulista, Brasil

E-mail: draemillyalves@gmail.com

Nilton Costa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2081-376X>

Faculdade do Centro Oeste Paulista, Brasil

E-mail: nltncst41@gmail.com

Alexandre Rodrigues da Ponte

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6666-4127>

Faculdade do Centro Oeste Paulista, Brasil

E-mail: ale_rp100@hotmail.com

Andressa Nascimento Lira da Ponte

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5600-3444>

Faculdade do Centro Oeste Paulista, Brasil

E-mail: lira_dessa@hotmail.com

Wanderson Roberto Azevedo dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9203-4384>

Faculdade do Centro Oeste Paulista, Brasil

E-mail: wandersongrfc@hotmail.com

Resumo

A ortodontia tem evoluído ao longo dos anos, buscando tratamentos mais rápidos, eficazes e estéticos, com os alinhadores transparentes ganhando popularidade por sua discricão e conforto. O processo de fabricação dos alinhadores pode ser feito por impressão 3D direta ou termoformagem, sendo que ambos os métodos têm vantagens e desvantagens. A termoformagem envolve o aquecimento de um material termoplástico sobre um modelo para criar o alinhador. Este processo pode modificar as propriedades mecânicas do material, como a espessura e a resistência, influenciando a eficácia do tratamento ortodôntico. Já a impressão 3D direta utiliza dados digitais para criar os alinhadores camada por camada, sem a necessidade de moldes, o que resulta em maior precisão dimensional e estabilidade das propriedades mecânicas, como resistência e rigidez. Esta revisão tem como objetivo comparar as propriedades mecânicas dos alinhadores ortodônticos impressos de com os alinhadores termorformados. Estudos mostram que os alinhadores impressos em 3D apresentam melhor precisão de ajuste e maior resistência à deformação quando comparados aos termoformados, além de não sofrerem alterações significativas devido ao calor. No entanto, ainda são necessários mais estudos para avaliar completamente a eficácia e a biocompatibilidade dessa tecnologia. Em conclusão, a impressão 3D direta se destaca como uma evolução na fabricação de alinhadores ortodônticos, proporcionando resultados mais precisos e eficazes, embora mais pesquisas sejam necessárias para consolidar seu uso clínico.

Palavras-chave: Alinhadores estéticos; Termoformagem; Impressão 3D.

Abstract

Orthodontics has evolved over the years, seeking faster, more effective and aesthetic treatments, with clear aligners gaining popularity due to their discretion and comfort. The manufacturing process for aligners can be done by direct 3D printing or thermoforming, with both methods having advantages and disadvantages. Thermoforming involves

heating a thermoplastic material over a model to create the aligner. This process can modify the mechanical properties of the material, such as thickness and strength, influencing the effectiveness of orthodontic treatment. Direct 3D printing uses digital data to create the aligners layer by layer, without the need for molds, which results in greater dimensional accuracy and stability of mechanical properties, such as strength and rigidity. This review aims to compare the mechanical properties of printed orthodontic aligners with thermoformed aligners. Studies show that 3D printed aligners have better fit accuracy and greater resistance to deformation when compared to thermoformed ones, in addition to not undergoing significant changes due to heat. However, more studies are still needed to fully evaluate the effectiveness and biocompatibility of this technology. In conclusion, direct 3D printing stands out as an evolution in the manufacture of orthodontic aligners, providing more precise and effective results, although more research is needed to consolidate its clinical use.

Keywords: Aesthetic aligners; Thermoforming; 3D printing.

Resumen

La ortodoncia ha evolucionado con el paso de los años, buscando tratamientos más rápidos, eficaces y estéticos, siendo los alineadores transparentes ganando popularidad por su discreción y comodidad. El proceso de fabricación de alineadores se puede realizar mediante impresión 3D directa o termoformado, teniendo ambos métodos ventajas y desventajas. El termoformado implica calentar un material termoplástico sobre una plantilla para crear el alineador. Este proceso puede modificar las propiedades mecánicas del material, como el espesor y la resistencia, influyendo en la eficacia del tratamiento de ortodoncia. La impresión 3D directa utiliza datos digitales para crear alineadores capa por capa, sin necesidad de moldes, lo que da como resultado una mayor precisión dimensional y estabilidad de las propiedades mecánicas, como la resistencia y la rigidez. Esta revisión tiene como objetivo comparar las propiedades mecánicas de los alineadores de ortodoncia impresos con los alineadores termoformados. Los estudios demuestran que los alineadores impresos en 3D tienen mejor precisión de ajuste y mayor resistencia a la deformación en comparación con los termoformados, además de no sufrir cambios significativos por el calor. Sin embargo, aún se necesitan más estudios para evaluar completamente la eficacia y biocompatibilidad de esta tecnología. En conclusión, la impresión 3D directa destaca como una evolución en la fabricación de alineadores de ortodoncia, proporcionando resultados más precisos y eficaces, aunque se necesita más investigación para consolidar su uso clínico.

Palabras clave: Alineadores estéticos; Termoformado; Impresión 3D.

1. Introdução

A ortodontia iniciou sua trajetória histórica em torno do ano de 1900, evoluindo desde as bandas de metal ajustadas aos dentes até aparelhos colados nas superfícies vestibular e lingual dos dentes, bráquetes autoligados e estéticos, mini-implantes e miniplacas, e por fim, modelos digitais, entre outros. A busca contínua pelo aperfeiçoamento dos materiais e técnicas suscita em todos o desejo de tratar os pacientes mais rapidamente, com melhores técnicas e de forma indolor (Bosio, 2010).

Os aparelhos ortodônticos possuem efeitos na aparência dos pacientes e, por esse motivo, a evolução ortodôntica, nos últimos anos, foi acompanhada por um aumento nas demandas estéticas (Papadimitriou et al., 2028). Isso estimulou a geração de dispositivos ortodônticos que atendessem a demanda desses pacientes (Feu et al., 2012 apud Couto & Abreu, 2020), uma vez que os aparelhos ortodônticos fixos convencionais constituídos por bandas, bráquetes, fios e ligaduras (Melkos. 2005 apud Couto & Abreu, 2020), algumas vezes, são associados à um comprometimento geral da aparência facial (Papadimitriou et al., 2028).

Ao longo da última década, os alinhadores transparentes têm conhecido um crescimento exponencial em popularidade. Estes dispositivos discretos e removíveis, transformaram a forma como os ortodontistas abordam os tratamentos ortodônticos, oferecendo novas possibilidades e ampliando a gama terapêutica disponível para os ortodontistas. Ao contrário dos aparelhos fixos convencionais, os alinhadores transparentes oferecem uma estética superior e um conforto acrescido para o paciente. Estes são mais estéticos o que permite aos pacientes continuarem a sua vida cotidiana sem o embaraço frequentemente associado aos aparelhos metálicos tradicionais (Alami et al., 2022; Kau et al., 2023 apud Quivoron, 2024).

O fluxo digital para confecção de alinhadores, com as tecnologias disponíveis atualmente segue a seguinte ordem: aquisição de imagens, setup virtual em software, impressão dos modelos exportados pelo software, termoplastificação destes modelos para originar os alinhadores e acabamento dos alinhadores (Hzeveld et al., 2014).

Os alinhadores podem ser fabricados por impressão direta, com resinas especiais com memória de forma, ou podem ser fabricados de forma indireta, pela termoplastificação de laminados poliméricos sobre modelos físicos de sub-*setups* impressos em resina fotossensível, a partir do estagiamento dos movimentos dentários em modelos virtuais digitais (Souki et al., 2023).

A termoformagem é um método comumente utilizado para fabricar/imprimir os alinhadores. Neste processo, a placa é aquecida e moldada sobre um modelo de resina (sob pressão direta ou à vácuo) no qual o movimento ortodôntico necessário já foi programado. Este processo altera a estrutura amorfa do polímero, aumentando o seu módulo de elasticidade, mas também a sua capacidade de absorção de água. Nos alinhadores termoformados, o ajuste depende dos processos de fabricação (temperatura e pressão definidas), do módulo de elasticidade dos materiais utilizados, da presença de reentrâncias e encaixes, bem como dos fenômenos de expansão hidros cópica quando o alinhador está em contato com a saliva ou água (Bucci et al., 2019 apud Perucchi, 2023).

Existem dois métodos de termoformar os alinhadores: vácuo ou a pressão. Os alinhadores termoformados a pressão fornecem forças mais elevadas dos que termoformados a vácuo (Hahn et al., 2009). O método de termoformação dos alinhadores encontra-se diretamente relacionado com o comportamento biomecânico dos mesmos. Alinhadores termoformados a pressão têm momentos de força mais elevados em movimentos de inclinação e rotação quando comparados com os termoformados a vácuo (Brockmeyer et al., 2017).

Os alinhadores diretamente impressos surgiram recentemente, e por ser uma tecnologia muito atual, estudos ainda são necessários para seu melhor entendimento com relação a aplicabilidade, compatibilidade biológica com relação ao material utilizado, biomecânica e acurácia (Panayi et al., 2023 apud Pereira, 2023). Eles são confeccionados seguindo o mesmo fluxo de trabalho dos alinhadores termoplastificados, com a diferença que não necessitam de um modelo pois são diretamente confeccionados com resinas biocompatíveis (Tartaglia et al., 2021).

Embora a eficácia clínica dos alinhadores transparentes possa ser afetada por vários fatores, as propriedades dos materiais utilizados para sua fabricação continuam sendo um dos aspectos mais essenciais na determinação de suas características mecânicas e clínicas.

Esta revisão tem como objetivo comparar as propriedades mecânicas dos alinhadores ortodônticos impressos de com os alinhadores termoformados.

2. Metodologia

Este artigo consistiu em um estudo exploratório de natureza qualitativa de revisão bibliográfica (Pereira et al., 2018) do tipo específico de revisão narrativa (Rother, 2007; Mattos, 2015; Casarin et al., 2020), realizado por meio da busca eletrônica de artigos científicos nas bases de dados do portal de periódicos da SciELO, PubMed e na Lilacs. Para a busca dos artigos foram utilizados os seguintes descritores: alinhadores invisíveis, propriedades mecânicas de alinhadores invisíveis, termoformação de alinhadores, impressão direta de alinhadores.

A seleção inicial dos estudos foi realizada a partir da verificação dos títulos e da análise dos resumos disponíveis. Em seguida, os artigos completos foram avaliados conforme os critérios de inclusão previamente estabelecidos, com o objetivo de determinar sua relevância para a revisão sistemática.

3. Resultados

A busca por tratamentos ortodônticos que atendam às demandas de estética, funcionalidade e saúde bucal é uma preocupação comum entre os pacientes. Essa preocupação é particularmente visível no caso de adultos, que estão cada vez

mais em busca de alternativas ortodônticas que atendam a esses requisitos. Nesse contexto, a procura por aparelhos ortodônticos removíveis e invisíveis tem aumentado significativamente (Sousa et al., 2021). Os primeiros indícios deste conceito remontam ao início do século XX (Bichu et al., 2022).

Em 1945, Harold Kesling, um precursor nesta área, apresentou o primeiro alinhador dentário. Este aparelho em borracha flexível de uma peça única, destinava-se ao acabamento ortodôntico dos sistemas convencionais. O aparelho foi confeccionado com um objetivo de conservação do alinhamento com a possibilidade de integrar alguns pequenos movimentos dentários. Kesling levantou a hipótese de que uma série de alinhadores poderia ser usada para realizar movimentos dentários maiores, embora isso fosse impossível na época. Esta ideia se tornaria o conceito fundamental do tratamento com alinhadores transparentes (Elsasser, 1950 apud Quivoron, 2024).

Foi só em 1998 que a Food and Drugs Administration (FDA) aprovou a introdução formal dos alinhadores transparentes no arsenal ortodôntico para a Align Technology empregar o Invisalign® - explorando a tecnologia CAD-CAM e impressão 3D, estereolitografia e software de simulação de movimento dentário (Gracco et al., 2009).

Os primeiros alinhadores, comercializados em massa, foram feitos de poliuretano rígido de camada única (de metileno difenil diisocianato e 1,6-hexanodiol), um material não inerte, sujeito a alterações in vivo, relativamente estável na saliva, com tendências hidrofílicas dependentes das ligações químicas dentro dela (Gracco et al., 2009).

Essa primeira geração dos dispositivos, possuía como mecanismo de ação exclusivamente o contato entre os dentes e o alinhador para atingir seus resultados, tornando-o limitado a pequenas movimentações. E foi a partir disso, que a fabricante passou a incentivar o uso de acessórios de resina e elásticos e desgastes interproximais, na tentativa de melhorar os resultados de tratamento com os alinhadores de segunda geração (Kandhan, 2022).

É então em 1999, que o aparelho conhecido até hoje é estabelecido. Os alinhadores de terceira geração surgem para trazer melhores resultados agindo sobre attachments, agora colocados automaticamente pelo software do fabricante, que já pré-ajustava os attachments que seriam utilizados, controlando a partir dos seus formatos, a maneira como os alinhadores aplicavam as forças no dente (Kandhan, 2022).

O primeiro passo da confecção dos alinhadores é a aquisição de dados intraorais, que tanto podem ser coletados via escaneamento digital diretamente na boca do paciente, quanto por escaneamento de moldes de pacientes, onde um scanner de mesa será utilizado para escanear um modelo físico. Porém, uma vez que, o fluxo digital veio para evitar a etapa de moldagem e a fabricação de modelos, o escaneamento intraoral fica como a melhor opção para reduzir o espaço que seria ocupado por modelos dos pacientes (Christensen, 2017).

O set-up virtual continua fluindo por meio de softwares de forma que a margem e os dentes são definidos e separados a fim de permitir movimentações de acordo com o planejamento que será realizado pelo ortodontista, posteriormente, o número de alinhadores é definido, além da necessidade de recursos acessórios como attachments (Thakkar et al., 2023) ou desgastes interproximais (Shah et al., 2022).

A partir daqui dois caminhos podem ser tomados, ou os modelos são nomeados e enviados para a impressora 3D para serem impressos e posteriormente termoplastificados, ou podem ser manipulados alinhadores diretamente nos modelos, e esses que serão impressos (Shah et al., 2022).

3.1 Termoformagem

A termoformação é o passo da confecção dos alinhadores no qual uma lâmina de material termoplástico será aquecida e moldada no modelo gerado pela impressão 3D. Esse procedimento pode ser feito à vácuo, ou por pressão, sendo o último o mais utilizado na odontologia em função da sua precisão e desempenho (Thakkar et al., 2023).

Para confecção dos alinhadores por pressão é empregado calor e pressão positiva para moldar o plástico no modelo. Uma prensa pneumática aplica pressão controlada, geralmente medida em “bar”, para garantir um ajuste preciso e consistente. A faixa de carga típica para máquinas termoformadoras sob pressão varia de 2 a 6 bars, dependendo do material a ser trabalhado e da máquina. A termoformagem por pressão é ideal para copiar pequenos detalhes, garantindo ajuste e contorno precisos do alinhador. Outra vantagem das máquinas de pressão é a possibilidade de uniformidade da fabricação pelo controle automatizado do tempo de aquecimento, da pressão e resfriamento do plástico (Souki et al., 2023).

A termoformagem a vácuo, por outro lado, utiliza pressão negativa (vácuo) para puxar a lâmina de plástico aquecida para o modelo. As máquinas a vácuo, normalmente, operam a uma pressão mais baixa, variando de 0,2 a 0,8 bar. Mesmo com uma carga menor, esse método é eficiente e adequado para produção de contenções e de alinhadores (Souki et al., 2023). As principais desvantagens são a dificuldade de se padronizar por automação o processo, ficando dependente das variações do operador (Dogramaci et al., 2018).

Mas de forma geral, a termoformação de laminados plásticos sobre modelos impressos em resina, tanto por pressão como por vácuo, oferece adequada precisão, garantindo que os alinhadores ortodônticos se encaixem confortavelmente aos dentes e forneçam satisfatórios resultados clínicos de movimentações ortodônticas (Souki et al., 2023).

Os alinhadores termoformados apresentam espessuras variadas, que vão de 0,5 mm a 1,5 mm, essa variação de espessura pode afetar suas propriedades e eficácia clínica ao provocar o movimento dentário através da pressão na superfície do dente. A uniformidade da espessura do alinhador tem uma função crucial na intensidade das forças aplicadas: variações na espessura afetam a exatidão e a aderência aos dentes (Tartaglia et al., 2020).

3.2 Impressão Direta

A impressão 3D permite a fabricação de peças camada por camada em vez de métodos comuns de fabricação que dependem de usinagem, moldagem e métodos subtrativos (Prasad et al., 2018). O processo de fabricação da técnica de impressão 3D direta contorna a etapa da construção física do modelo odontológico e o alinhador é construído diretamente com base em dados odontológicos 3D armazenados eletronicamente (Zinelis et al., 2022). Os materiais usados também são bastante diferentes, com resinas epóxi e fotopolímeros sendo predominantes (Nakano et al., 2019; Maspero & Tartaglia, 2020).

O fato de serem mais práticos e rápidos a título de manufatura, reduzirem a produção de lixo e apresentarem menor perda de propriedades mecânicas com o uso do paciente são fatores que têm contribuído para que esta seja uma nova evolução dos alinhadores (Panayi et al., 2023). Além de não ter a desvantagem dos termoformados de alteração da espessura e das propriedades com o aquecimento do material (Rajasekaran et al., 2023).

Após impressos os alinhadores passam pelo processo de cura UV que tem a capacidade de reforçar significativamente a rigidez e a resistência mecânica compressiva de alinhadores transparentes produzidos diretamente por meio da impressão 3D. É importante enfatizar que as etapas de processamento pós-impressão são indispensáveis para garantir a estabilidade mecânica desses alinhadores (McCarty, et al., 2020). Curiosamente, os alinhadores submetidos à pós-cura exibem resistência substancialmente maior às forças compressivas em comparação com suas contrapartes não curadas, com temperaturas de pós-cura mais altas se mostrando mais vantajosas (Goracci et al., 2023).

3.3 Termoformagem X Impressão Direta

3.3.1 Precisão Dimensional

Para o teste de precisão dimensional, realizado por Jindal et al., (2019) a altura de cada dente na dentição mandibular foi medida por 5 observadores diferentes uma vez em cada um dos locais necessários. A distância entre os pontos de

intersecção da linha média do dente na superfície bucal com a linha da gengiva e na borda incisal foi tomada como a altura da coroa para o dente selecionado.

As diferenças relativas médias do arquivo STL para alinhadores impressos em 3D foram de 2,55%; enquanto o alinhador termoformado foi de 4,41%, o que indicou que os alinhadores impressos em 3D poderiam fornecer melhores resultados de ajuste devido às suas medidas geométricas superiores. Essas descobertas são evidentes mesmo pela diferença absoluta média entre o alinhador impresso em 3D (0,21 mm) e o alinhador termoformado (0,37 mm). O desvio padrão para as medições obtidas pelos 5 observadores para cada dente foi considerado baixo (0,03 - 0,09 mm) para ambos os tipos de alinhadores, indicando valores esperados, que estavam próximos dos valores médios das alturas dos dentes.

3.3.2 Teste de Compressão

Durante um teste de compressão realizado mostra o comportamento da resistência da carga com deslocamento entre os alinhadores transparentes impressos em 3D não curados, os alinhadores 3D curados alinhadores impressos e alinhadores transparentes termoformados. Os alinhadores não curados exibiram fluxo plástico com alta deformação à medida que a carga aumentava atingindo uma carga máxima de 380 N e deslocamento de quase 6,1 mm. Alinhadores curados 80 C durante 20 minutos poderia resistir a uma carga máxima de quase 662 N antes de fragmentar repentinamente em peças fráglil. Alinhadores submetidos a 80 C por 15 minutos são indicados carga de resistência máxima de 531 N com uma frágil fratura no final. Alinhadores curados deformados elasticamente e a deformação final foi de quase 2,93 mm. Nos termoformados a deformação dos alinhadores com o aumento da carga foi semelhante aos alinhadores impressos em 3D não curados. A deformação era plástico com deformação maior e irreversível até até quase 8,6 mm com uma carga máxima de 584 N. Plástico fluxo sem qualquer resistência à carga externa indica baixa resistência à deformação.

3.3.3 Estrutura

Durante o tratamento ortodôntico, os dentes são submetidos a várias forças para guiá-los para suas posições corretas. Portanto, é crucial que os materiais do alinhador suportem essas tensões de forma eficaz (Milovanović et al., 2021). Quaisquer alterações nas propriedades do material de um alinhador após a aplicação podem resultar em perda de controle sobre o movimento dos dentes durante seu uso (Milovanović et al., 2021; Cianci et al., 2020).

Um estudo conduzido por Can et al., (2022) investigou o impacto do envelhecimento in vivo nas propriedades mecânicas usando resina TC-85 para alinhadores transparentes, com foco na dureza, módulo de indentação, índice de elasticidade e relaxamento de indentação. Eles descobriram que os alinhadores transparentes são suscetíveis à degradação por fatores como água, micróbios e fungos. As diferenças na estrutura entre alinhadores impressos em 3D e termoformados podem explicar as variações nas propriedades mecânicas. Os alinhadores termoformados se beneficiam de grupos aromáticos, aumentando a dureza em uma faixa de módulo de indentação semelhante. Notavelmente, os alinhadores impressos em 3D exibiram um índice de relaxamento significativamente maior em comparação aos alinhadores termoformados, indicando uma maior suscetibilidade a reações secundárias, incluindo degradação hidrolítica envolvendo a fração éster.

4. Discussão

De acordo com estudos realizados por Lee et al., (2022), os materiais comumente empregados na fabricação de alinhadores ortodônticos podem sofrer deformações durante o processo de termoformação, resultando em uma espessura final de aproximadamente 55% daqueles presentes antes do aquecimento para a confecção do alinhador. Essa considerável alteração no material, conforme observado por Lee, representa um obstáculo significativo para alcançar a previsibilidade total no tratamento ortodôntico.

Elkholy et al., (2016) discorda afirmando que as diferenças de espessura entre 0,5 mm e 0,625 mm e 0,625 mm e 0,75 mm seriam irrelevantes e, portanto, a espessura de 0,625 mm poderia ser removida do protocolo recomendando então a sequência de 0,4 mm; 0,5 mm e 0,75 mm de espessura de folha termoplástica, garantindo um aumento progressivo da força.

Um dos resultados negativos do processo termoplástico que foi relatado é que há mudanças significativas nas propriedades do material em resposta à geração de calor usada para formar o material ao redor dos dentes. Ryu et al. estudaram mudanças em quatro tipos de materiais de termoformagem após o processo de termoformagem. O estudo mostrou que a termoformagem afeta a transparência do material mais espesso, diminuindo-a e aumenta propriedades de absorção de água, solubilidade em água e também pode modificar a dureza da superfície de alguns plásticos.

Estudos recentes apoiam a impressão direta, como um que revelou que resinas fotocuráveis usadas na impressão 3D de alinhadores exibem propriedades termomecânicas e viscoelásticas favoráveis. Isso permite a aplicação consistente de forças leves nos dentes, fundamental no tratamento ortodôntico (Lee, 2022). Outro estudo, publicado em 2023, enfatizou o potencial da impressão direta de alinhadores transparentes como uma alternativa precisa e eficiente ao método de termoformação (Rajasekaran, 2023).

Para Tartaglia (2021) a impressão 3D direta de alinhadores transparentes é uma forte evolução tecnológica na Ortodontia e uma abordagem inovadora que vem ganhando destaque. Essa técnica permite a criação de alinhadores altamente precisos, projetados digitalmente e reproduzidos de forma idêntica para todo o conjunto de tratamento. Isso resulta em alinhadores que oferecem melhor ajuste, maior eficácia e reprodutibilidade.

Já para Silva et al., (2024) apesar impressão 3D direta representar uma evolução promissora na fabricação de alinhadores transparentes se faz necessária a realização de mais estudos *in vitro* e *in vivo* para testar essas novas tecnologias e materiais, a fim de aprimorar ainda mais a eficácia do tratamento ortodôntico com alinhadores transparentes.

5. Conclusão

A comparação entre os alinhadores ortodônticos impressos diretamente e os alinhadores termoformados revela importantes avanços tecnológicos e benefícios para o tratamento ortodôntico, visto que impressão 3D direta de alinhadores tem se mostrado uma alternativa promissora, proporcionando uma maior precisão dimensional, menor alteração das propriedades mecânicas e um processo de fabricação mais rápido e eficiente, já alinhadores impressos diretamente oferecem vantagens significativas em termos de ajuste e conforto, devido à sua produção baseada em dados digitais exatos e a eliminação de distorções típicas da termoformagem, como a variação de espessura do material e a alteração das propriedades mecânicas. Com base nessas premissas mais estudos sobre o tema devem ser realizados, uma vez que a atual demanda estética vem aumentando cada vez mais o uso dos alinhadores.

Referências

- Bichu, Y. M., Alwafi, A., Liu, X., Andrews, J., Ludwig, B., Bichu, A. Y., & Zou, B. (2022). Advances in orthodontic clear aligner materials. *Bioactive Materials*, 22, 384–403. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.10.006>
- Bosio, J. A., & Liu, D. (2010). Movimentação dentária mais rápida, melhor e indolor: será possível? *Dental Press Journal of Orthodontics*, 15(6), 14–17.
- Brockmeyer, P., Kramer, K., Böhrnsen, F., Gruber, R. M., Batschkus, S., Rödig, T., & Hahn, W. (2017). Removable thermoplastic appliances modified by incisal cuts show altered biomechanical properties during tipping of a maxillary central incisor. *Progress in Orthodontics*, 18(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/S40510-017-0183-Z>
- Bucci, R., Rongo, R., Levaté, C., Michelotti, A., Barone, S., Razionale, A. V., & D'Antò, T. (2019). Thickness of orthodontic clear aligners after thermoforming and after 10 days of intraoral exposure: A prospective clinical study. *Progress in Orthodontics*, 20, 36.
- Can, E., Panayi, N., Polychronis, G., Papageorgiou, S. N., Zinelis, S., Eliades, G., & Eliades, T. (2022). Alinhadores impressos em 3D internamente: Efeito do envelhecimento *in vivo* em propriedades mecânicas. *European Journal of Orthodontics*, 44, 51–55.

- Casarin, S. T. et al. (2020). Tipos de revisão de literatura: considerações das editoras do Journal of Nursing and Health. *Journal of Nursing and Health*, 10 (5). <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/enfermagem/article/view/19924>. 10)
- Christensen, L. R. (2017). Digital workflows in contemporary orthodontics. *APOS Trends in Orthodontics*, 7(1), 12–18.
- Cianci, C., Pappalettera, G., Renna, G., Casavola, C., Laurenziello, M., Pappalettere, C., & Ciavarella, D. (2020). Comportamento de fadiga por compressão cíclica de alinhadores dentários PET-G. In *Anais do Simpósio Internacional IEEE de 2020 sobre Medidas e Aplicações Médicas (MeMeA)*, Bari, Itália, 1 de junho a 1 de julho de 2020 (pp. 1–6).
- Couto, B. L. B., & Abreu, L. G. (2020). Comparação entre alinhadores ortodônticos e aparelhos ortodônticos fixos convencionais: Uma revisão sistemática e meta-análise. *Arquivos em Odontologia*, 56. <https://doi.org/10.7308/aodontol/2020.56.e30>
- Dogramaci, E., Chubb, D., & Rossi, F. G. (2018). Orthodontic thermoformed retainers: A two-arm laboratory study into post-fabrication outcomes. *Australian Dental Journal*, 63(3), 347–355.
- Elkhoy, F., Schmidt, F., Jager, R., & Lapatki, B. G. (2016). Forces and moments delivered by novel, thinner PET-G aligners during labio-palatal bodily movement of a maxillary central incisor: An in vitro study. *Angle Orthodontist*, 86(6), 883–890. <https://doi.org/10.2319/011316-37R.1>
- Feu, D., Catharino, F., Duplat, C. B., & Capelli, J. J. (2012). Esthetic perception and economic value of orthodontic appliances by lay Brazilian adults. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 17(5), 102–114.
- Goracci, C., Juloski, J., D'Amico, C., Balestra, D., Volpe, A., Juloski, J., & Vichi, A. (2023). Propriedades clinicamente relevantes de materiais imprimíveis em 3D para uso intraoral em ortodontia: Uma revisão crítica da literatura. *Materials*, 16, 2166. <https://doi.org/10.3390/ma16062166>
- Gracco, A., Mazzoli, A., Favoni, O., Conti, C., Ferraris, P., Tosi, G., et al. (2009). Short-term chemical and physical changes in Invisalign appliances. *Australian Orthodontic Journal*, 25(1), 34–40.
- Hahn, W., Fialka-Fricke, J., Dathe, H., Fricke-Zech, S., Zapf, A., Gruber, R., Kubein-Meesenburg, D., & Sadat-Khonsari, R. (2009). Initial forces generated by three types of thermoplastic appliances on an upper central incisor during tipping. *European Journal of Orthodontics*, 31(6), 625–631. <https://doi.org/10.1093/EJO/CJP047>
- Hazeveld, A., Slater, J. J. R. H., & Ren, Y. (2014). Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 145(1), 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.05.011>
- Jindal, P., Juneja, M., Siena, F., Bajaj, D., & Breedon, P. (2019). Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 156(5), 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.05.012>
- Kandhan, G. (2022). Clear aligners in orthodontic tooth movement: A conceptual review. *Journal of Advanced Medical and Dental Sciences Research*, 10(4), 40–43.
- Lee, S. Y., Kim, H., Kim, H.-J., Chung, C. J., Choi, Y. J., Kim, S.-J., & Cha, J.-Y. (2022). Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. *Scientific Reports*, 12(1), 6246. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09831-4>
- Maspero, C., & Tartaglia, G. M. (2020). Impressão 3D de alinhadores ortodônticos transparentes: Onde estamos e para onde vamos. *Materials*, 13(22), 5204. <https://doi.org/10.3390/ma13225204>
- McCarty, M. C., Chen, S. J., Inglês, J. D., & Kasper, F. (2020). Efeito da orientação da impressão e duração da cura ultravioleta na precisão dimensional de um design de alinhador transparente ortodôntico impresso tridimensionalmente. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 158, 889–897. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.05.015>
- Melkos, A. B. (2005). Advances in digital technology and orthodontics: A reference to the Invisalign method. *Medical Science Monitor*, 11(5), PI39–PI42.
- Milovanović, A., Sedmak, A., Golubović, Z., Zelić-Mihajlović, K., Zurkić, A., Trajković, I., & Milošević, M. (2021). O efeito do tempo nas propriedades mecânicas de resinas fotopoliméricas biocompatíveis usadas para fabricação de alinhadores dentais transparentes. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 119, 104494. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104494>
- Nakano, H., Kato, R., Kakami, C., Okamoto, H., Mamada, K., & Maki, K. (2019). Desenvolvimento de resinas biocompatíveis para impressão 3D de alinhadores diretos. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 32(2), 209–216. <https://doi.org/10.2494/jpst.32.209>
- Panayi, N., Cha, J. Y., & Kim, K. B. (2023). 3D Printed aligners: Material science, workflow, and clinical applications. *Seminars in Orthodontics*, 29(1), 25–33. <https://doi.org/10.1053/j.sodo.2023.03.001>
- Papadimitriou, A., Mousouleas, S., Gkantidis, N., & Kloukos, D. (2018). Clinical effectiveness of Invisalign® orthodontic treatment: A systematic review. *Progress in Orthodontics*, 19(1), 37. <https://doi.org/10.1186/s40510-018-0231-z>
- Pereira, T. V. S. (2023). Evolução dos alinhadores “IN-OFFICE”: Versatilidade no tratamento ortodôntico e perspectivas futuras. Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública, Salvador.
- Pereira, A. S. Shitsuka, D. M. Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free ebook]. Santa Maria: Ed. UFSM.
- Perucchi, M. M. (2023). Previsibilidade dos movimentos dentários com alinhadores termoformados: Revisão de literatura. Monografia apresentada ao Curso de Especialização Lato Sensu, Programa de Pós-Graduação em Ortodontia da Faculdade Sete Lagoas – FACSETE, Sociedade Paulista de Ortodontia, São Paulo.
- Prasad, S., Kader, N. A., Sujath, G., & Raj, T. (2018). Impressão 3D em odontologia. *Journal of 3D Printing in Medicine*, 2, 89–91. <https://doi.org/10.1515/j3dpm-2018-0008>

- Quivoron, L. E. (2024). Alinhadores: Quais as limitações – Uma revisão narrativa. Instituto Universitário Egas Moniz, obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária, Julho de 2024.
- Rajasekaran, A., & Chaudhari, P. K. (2023). Integrated manufacturing of direct 3D-printed clear aligners. *Frontiers in Dental Medicine*, 3, 1–6. <https://doi.org/10.3389/fdent.2023.1068879>
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta Paul. Enferm.* 20 (2). <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>. Mattos, P. C. (2015). Tipos de revisão de literatura. Unesp, 1-9. <https://www.fca.unesp.br/Home/Biblioteca/tipos-de-revisao-de-literatura.pdf>.
- Ryu, J. H., Kwon, J. S., Jiang, H. B., Cha, J. Y., & Kim, K. M. (2018). Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. *Korean Journal of Orthodontics*, 48(5), 316–325. <https://doi.org/10.4041/kjod.2018.48.5.316>
- Shah, M. J., Kubavat, A. K., Patel, K. V., & Prajapati, N. H. (2022). Fabrication of in-house aligner - A review. *Journal of Contemporary Orthodontics*, 6(3), 120–124. <https://doi.org/10.5005/jco-2022-0034>
- Silva, G. H. C., Beatrice, A., Takamori, E. R., & Granjeiro, J. M. (2024). Análise de forças de movimentação e características físico-químicas em alinhadores ortodônticos: Avanços tecnológicos e considerações críticas. *International Journal of Science Dentistry*, 3, 143–156. <https://periodicos.uff.br/ijosd/article/view/60280>
- Souki, B. Q., Maia, R. M., Azevedo, G. M., Tavares, L. D. F., & Bosoni, C. (2023). Guia prático de fabricação de alinhadores in house - Parte 3: Impressão de modelos, pós-processamento, termoplastificação, acabamento e gestão clínica. *Orthodontic Science and Practice*, 16(63), 115–133. <https://doi.org/10.24077/2023;1663-063013258>
- Sousa, H. A. F., Nascimento, J. J. P. N. F., Sousa, M. A. F., Genari, B., Souza, A. O., & Degrazia, F. W. (2021). Aparelhos ortodônticos invisíveis: Uma revisão. *Research, Society and Development*, 10(1), e5510111259. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11259>
- Tartaglia, G. M., Mapelli, A., Maspero, C., Santaniello, T., Serafin, M., Farronato, M., et al. (2021). Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: Current state and future possibilities. *Materials*, 14(7), 1799. <https://doi.org/10.3390/ma14071799>
- Thakkar, D., Benattia, A., Bichu, Y. M., Zou, B., Aristizabal, J. F., Fadia, D., et al. (2023). Seamless workflows for in-house aligner fabrication. *Seminars in Orthodontics*, 29(1), 17–24. <https://doi.org/10.1053/j.sodo.2023.03.002>
- Zinelis, S., Panayi, N., Polychronis, G., Papageorgiou, S. N., & Eliades, T. (2022). Análise comparativa das propriedades mecânicas de alinhadores ortodônticos produzidos por diferentes impressoras 3D contemporâneas. *Craniofacial Orthodontics Research*, 25, 336–341. <https://doi.org/10.1111/ocr.12537>