

ANÁLISE DE FORÇAS DE MOVIMENTAÇÃO E CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS EM ALINHADORES ORTODÔNTICOS: AVANÇOS TECNOLÓGICOS E CONSIDERAÇÕES CRÍTICAS

Analysis of motion forces and physicochemical characteristics in orthodontic aligners: technological advances and critical considerations

Access this article online	
Quick Response Code:	
	Website: https://periodicos.uff.br/ijosd/article/view/60280
	DOI: 10.22409/ijosd.v3i65.60280

Autores:**Gustavo Holderbaum da Costa e Silva**

Especialista em Ortodontia e Odontologia Legal.

Anderson Beatrici

Doutor em Ciências.

Esther Rieko Takamori

Doutora em Biologia Oral.

José Mauro Granjeiro

Doutor em Ciências.

Instituição na qual o trabalho foi realizado: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO.**Endereço para correspondência:** Gustavo Holderbaum da Costa e Silva Telefone: 24 2237-4726 .

Celular: 24 98188-2660

E-mail para correspondência: dr.gustavoholderbaum@gmail.com

RESUMO

O avanço tecnológico revolucionou a prática odontológica, com os alinhadores ortodônticos emergindo como uma escolha altamente popular entre pacientes que buscam tratamentos estéticos e confortáveis. No entanto, apesar de sua



crescente demanda, permanecem questões cruciais relacionadas à eficácia e análise dimensional desses dispositivos. Este artigo oferece uma análise abrangente das características químicas, físicas e mecânicas dos alinhadores ortodônticos, iluminando a influência vital do processo de termoformação e da espessura nas propriedades desses materiais. Compreender profundamente essas características é essencial para aprimorar a eficácia e a durabilidade dos alinhadores ortodônticos, contribuindo, assim, para o sucesso e a evolução dos tratamentos ortodônticos modernos. Neste estudo, exploraremos: 1) as propriedades químicas dos materiais e como elas afetam a biocompatibilidade e a resistência à degradação; 2) as características físicas, incluindo textura de superfície, transparência e sua influência na adaptação bucal e no conforto do paciente; 3) as propriedades mecânicas, como flexibilidade e rigidez, e como essas características afetam a distribuição de forças de movimentação dentária; 4) a influência do processo de termoformação na precisão e reprodutibilidade dos alinhadores, bem como sua relação com a qualidade do tratamento; 5) a análise crítica da espessura dos alinhadores e seu papel na capacidade de aplicar forças adequadas para a movimentação dentária. Ao abordar esses aspectos, este artigo visa oferecer uma visão holística das complexidades envolvidas na fabricação e uso de alinhadores ortodônticos. Esperamos que esta revisão contribua para uma compreensão mais profunda desses dispositivos e promova avanços significativos na ortodontia, beneficiando tanto os profissionais quanto os pacientes.

Palavras-chave: Alinhadores Estéticos; Torção Mecânica, Ciência dos Materiais.

ABSTRACT

Technological advancement has revolutionized dental practice, with orthodontic aligners emerging as a trendy choice among patients seeking aesthetic and comfortable treatments. However, despite their growing demand, crucial questions remain regarding these devices' effectiveness and dimensional analysis. This article offers a comprehensive analysis of the chemical, physical, and mechanical characteristics of orthodontic aligners, illuminating the vital influence of the thermoforming process and thickness on the properties of these materials. Understanding these characteristics in depth is essential to improving the effectiveness and durability of orthodontic aligners, thus contributing to the success and evolution of modern orthodontic treatments. In this study, we will explore 1) the chemical properties of materials and how these properties affect biocompatibility and resistance to degradation; 2) the physical characteristics, including surface texture, transparency and their influence on oral adaptation and patient comfort; 3) mechanical properties, such as flexibility and stiffness, and how these characteristics affect the distribution of tooth movement forces; 4) the



influence of the thermoforming process on the precision and reproducibility of the aligners, as well as its relationship with the quality of the treatment; 5) critical analysis of aligner thickness and its role in the ability to apply adequate forces for tooth movement. By addressing these aspects, this article aims to offer a holistic view of the complexities involved in manufacturing and using orthodontic aligners. We hope this review will contribute to a deeper understanding of these devices and promote significant advances in orthodontics, benefiting professionals and patients.

Keywords: Aesthetic Aligners; Mechanical Torque; Materials Science.

INTRODUÇÃO

A ortodontia, desde sua criação como especialidade odontológica no início do século XX, tem passado por transformações notáveis. No entanto, nas últimas décadas, assistimos a uma revolução verdadeiramente significativa no campo com a introdução dos alinhadores ortodônticos. Movidos pela busca incessante dos pacientes por tratamentos mais confortáveis e discretos, os alinhadores ortodônticos ganharam uma popularidade avassaladora desde sua introdução (TARTAGLIA, 2021).

Além disso, o avanço tecnológico, impulsionado pela Indústria 4.0 e pela tecnologia CAD-CAM, trouxe melhorias notáveis na precisão e eficácia dos tratamentos ortodônticos (CONDO, 2018). Essas inovações abriram novas fronteiras no campo da ortodontia, proporcionando resultados mais previsíveis e satisfatórios para pacientes e profissionais.

Este artigo se concentra em uma exploração aprofundada do uso dos alinhadores ortodônticos, destacando não apenas sua evolução tecnológica, mas também o processo de confecção e, fundamentalmente, a importância do controle das forças aplicadas durante o tratamento. Além disso, investigaremos as diferenças fundamentais entre alinhadores produzidos por empresas especializadas e aqueles confeccionados no próprio consultório do profissional, examinando as vantagens e desafios de cada abordagem.

Ainda mais importante, nossa análise se estenderá às características físicas, químicas e mecânicas dos materiais utilizados na fabricação dos alinhadores. Este estudo visa aprimorar a eficácia dos tratamentos ortodônticos, minimizar efeitos colaterais indesejados e promover uma movimentação dentária mais suave e constante, resultando em sorrisos mais saudáveis e satisfeitos.



Em um cenário onde a ortodontia se encontra em constante evolução, compreender a tecnologia por trás dos alinhadores e seu impacto nos resultados clínicos tornou-se essencial tanto para odontologistas quanto para pacientes em busca de tratamentos ortodônticos eficazes e confortáveis. Este artigo oferece uma análise aprofundada desses elementos cruciais, fornecendo uma base sólida para a prática ortodôntica contemporânea.

REVISÃO DE LITERATURA

A ortodontia, desde seus primórdios no início do século XX, tem passado por transformações notáveis e encontra-se atualmente à beira de uma quarta revolução. Uma das marcas mais significativas dessa evolução é a introdução dos alinhadores ortodônticos, um avanço impulsionado pela crescente demanda dos pacientes por tratamentos mais confortáveis e discretos (TARTAGLIA, 2021).

A combinação da chamada Indústria 4.0 com o desenvolvimento da tecnologia CAD-CAM, incluindo scanners intraorais e impressoras 3D, deu origem a uma revolução tecnológica na odontologia. Essa evolução tem resultado em tratamentos mais eficientes, um controle aprimorado dos casos e a entrega de resultados mais rápidos e precisos (CONDO, 2018).

Os alinhadores ortodônticos termoplásticos representam uma das opções mais procuradas por pacientes que buscam tratamentos confortáveis e discretos. Esses alinhadores, produzidos por meio de processos que envolvem escaneamento intraoral, planejamento ortodôntico assistido por software, impressão 3D e termoformação, adaptam-se perfeitamente aos dentes, tornando-se praticamente invisíveis durante o uso (TARTAGLIA, 2021).



Figura 1: Fluxograma do processo de confecção de alinhadores ortodônticos.

Atualmente, esses alinhadores são produzidos tanto por empresas especializadas quanto nos consultórios ortodônticos, conhecidos como alinhadores *in-office*. Ambas as abordagens apresentam vantagens distintas, com os alinhadores *in-office* oferecendo custos mais baixos para os pacientes e um maior controle por parte dos profissionais no planejamento e execução do tratamento. Por outro lado, os alinhadores comerciais proporcionam conveniência e, em alguns casos, tecnologia superior (TARTAGLIA, 2021).

A aplicação de forças nos dentes durante o tratamento ortodôntico é uma preocupação constante, pois forças inadequadas podem levar a efeitos colaterais, incluindo reabsorção radicular. Portanto, é essencial controlar cuidadosamente as forças aplicadas nos dentes durante o tratamento com alinhadores. Isso não envolve apenas o planejamento matemático, mas também a compreensão das características físicas, químicas e mecânicas dos materiais utilizados na fabricação dos alinhadores (SILVA, 2017).

Força Ótima Necessária:

Autor (ano)	Incisivos	Caninos
Schwarz (1932)	39 g a 53 g	62 g a 65 g
Reitan (1957)	42 g a 57 g	67 g a 70 g
Jarabak, Fizzell (1975)	70 g a 90 g	150 g
Shimizu (1995)	-	120 g a 150 g

Tabela 1: Força ótima necessária para movimentação dentária (THIESEN, 2005).

O material termoplástico desempenha um papel crítico no desempenho das forças ortodônticas geradas pelos alinhadores. Alinhadores fabricados por impressão 3D e submetidos à termociclagem podem apresentar limitações, como instabilidade dimensional e baixa resistência ao desgaste, que podem estar relacionadas tanto às características dos materiais quanto aos processos de produção (BARONE, 2017).

A geometria e as características físicas dos alinhadores também afetam seu perfil biomecânico e a aplicação de forças. A deformação dos materiais termoplásticos ao longo do tempo é uma propriedade importante a ser considerada, pois influencia o sistema ortodôntico de forças (SKAIK, 2019).

Propriedades Químicas:

Materiais	Poliuretano	PET-G	Polipropileno	Poliuretano	Policarbonato
Densidade	0,14 g/cm ³	1,27 g/cm ³	0,90 g/cm ³	0,97 g/cm ³	1,20 g/cm ³
Ponto de Fusão	225 °C	260 °C	160 °C	115 °C	225 °C
Fórmula Química	[C ₁₂ H ₂₂ N ₂ O ₄]	C ₁₄ H ₂₀ O ₅ S	(C ₃ H ₆) _n	(C ₂ H ₄) _n	(-[CO-O-pPh-C(CH ₃) ₂ -pPh-O]) _n

Tabela 2: Características químicas dos principais materiais utilizados para a fabricação de alinhadores.

Além disso, a espessura dos alinhadores desempenha um papel fundamental na força ortodôntica administrada. Para obter uma movimentação ortodôntica eficiente, é essencial encontrar um equilíbrio, geralmente variando de 0,5 a 0,8 mm (SILVA, 2017).

Os materiais usados na fabricação de alinhadores transparentes variam em termos de composição química e características físicas. Compreender essas diferenças é crucial para escolher o alinhador mais adequado para um determinado caso clínico (GOLD, 2021).

	Poliuretano	PET-G	Polipropileno	Poliétileno	Policarbonato
Biocompatibilidade	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Transparência	Excelente	Excelente	Baixa	Excelente	Boa
Resistência Química	Baixa	Boa	Boa	Boa	Baixa
Qualidade após Termoformação	Excelente	Boa	Excelente	Boa	Boa
Resistência à Rachadura	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa
Resistência ao Desgaste	Boa	Excelente	Boa	Boa	Baixa
Resistência Mecânica	Excelente	Boa	Boa	Regular	Boa

Tabela 3: propriedades de diferentes materiais utilizados na produção de alinhadores ortodônticos.

Hoje, a tecnologia permite a fabricação de alinhadores em consultórios, mas a escolha entre alinhadores comerciais e in-office depende das necessidades individuais do paciente e das habilidades do ortodontista (GOLD, 2021). À medida que a ortodontia se torna mais digital, a produção in-office torna-se uma alternativa viável, com dentistas utilizando scanners 3D e impressoras para criar alinhadores personalizados (JABER, 2022). Embora os alinhadores in-office possam apresentar movimentos dentários menos previsíveis, eles oferecem vantagens, como menor custo e maior controle no diagnóstico e planejamento do tratamento (TOZLU, 2021). A evolução na tecnologia 3D também afeta a produção de alinhadores, tornando-a mais acessível e melhorando a qualidade dos produtos utilizados em consultórios (JABER, 2022).

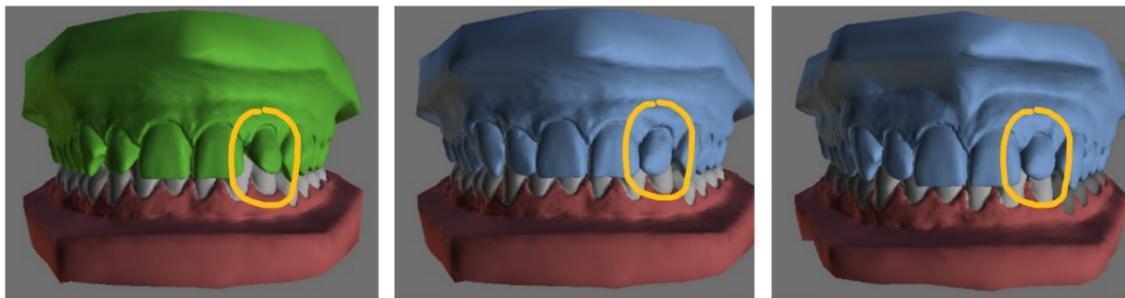


Figura 2: Comparação das imagens do planejamento digital dos dentes superiores de um caso real de alinhadores produzidos in-office. Da esquerda para a direita: escaneamento inicial, planejamento, resultado pós-tratamento (22 semanas).

Na ortodontia contemporânea, como vimos acima, a produção de alinhadores transparentes tem sido tradicionalmente realizada por meio do processo de termoformação, utilizando diversos tipos de materiais termoplásticos. No entanto, esse processo tem suas limitações, pois a termoformação pode alterar as propriedades do material, e o ambiente intraoral pode modificar ainda mais essas propriedades, afetando o desempenho geral do alinhador.



Na fronteira do conhecimento no campo da Ortodontia observamos o avanço na produção de alinhadores transparentes a partir de impressão 3D e materiais avançados. A impressão 3D permite a criação de alinhadores altamente personalizados com rapidez e precisão. Isso é possível devido à capacidade das impressoras 3D de criar camadas minuciosas de material, seguindo o modelo digital do paciente. Os principais aspectos da impressão 3D avançada para alinhadores ortodônticos estão resumidos na figura 3.

Estudos recentes apoiam essa abordagem inovadora, 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).

Uma investigação piloto com 10 pacientes adultos que necessitavam de tratamento ortodôntico e que apresentavam uma leve discrepância dentária no comprimento do arco, tanto na região anterior da maxila quanto na mandíbula, foi planejada para tratar pacientes com alinhadores (GUPTA, 2020). Após o registro ortodôntico, incluindo o escaneamento intraoral, os alinhadores transparentes foram projetados após e a conclusão da configuração do tratamento usando o software Orthoanalyzer foram impressos em 3D usando dois materiais diferentes – VeroWhite e VeroClear em uma impressora polyjet. Os alinhadores transparentes foram fabricados com material PET-G padrão a partir das etapas obtidas por impressão 3D. Os alinhadores transparentes fabricados localmente foram considerados uma modalidade de tratamento ortodôntico eficaz, porém há uma curva de aprendizado envolvida em sua preparação e fabricação virtual. Parece haver uma lacuna entre o estágio virtual desenvolvido e o resultado real do tratamento obtido.

DISCUSSÃO

A fabricação de alinhadores ortodônticos envolve a utilização de polímeros termoplásticos, notáveis por suas longas cadeias moleculares desordenadas e não cruzadas. Essas características são fundamentais para permitir que esses polímeros sofram deformação plástica quando submetidos ao aumento de temperatura, desempenhando um papel vital na criação de alinhadores personalizados para a correção de más oclusões (AUGUSTO, 2019).



A etapa culminante e crucial desse processo é conhecida como termoformação. Durante essa fase, uma lâmina do polímero é cuidadosamente aquecida à temperatura de trabalho, definida como aquela abaixo da qual o material pode ser moldado sem perder suas propriedades fundamentais, incluindo as mecânicas, físicas e químicas. A pressão e o calor são aplicados meticulosamente para modelar o alinhador dental com base no modelo de impressão 3D do paciente (AUGUSTO, 2019).

No entanto, a termoformação exerce impactos substanciais na espessura e nas propriedades mecânicas dos alinhadores ortodônticos. Estudos têm consistentemente revelado uma diferença significativa entre a espessura inicial e final dos materiais após o processo de termoformação. Essas variações destacam a influência direta desse processo na estrutura dos alinhadores, que sofrem deformações devido ao calor aplicado durante a termoformação (PRATTO, 2021; JINDAL, 2019).

Como resultado dessas alterações estruturais, os alinhadores tendem a demonstrar menor resistência à tração e uma maior propensão a deformações irreversíveis. Isso ocorre principalmente devido às mudanças na estrutura molecular do polímero, as quais afetam sua capacidade de resistir às forças ortodônticas¹⁵. Além disso, a espessura original do material, juntamente com sua variação durante a termoformação, exerce um impacto direto na força ortodôntica administrada pelos alinhadores. Esta força é diretamente proporcional à espessura, enfatizando a importância de encontrar um equilíbrio ideal, geralmente variando de 0,5 a 0,8 mm, para assegurar uma movimentação dentária eficiente durante o tratamento (AUGUSTO, 2019).

Entretanto, a influência da termoformação não se limita apenas às propriedades mecânicas dos alinhadores. Ela também afeta as características morfológicas dos polímeros termoplásticos. Estudos morfológicos conduzidos por meio de microscopia eletrônica de varredura têm demonstrado que os polímeros podem adquirir diferentes estruturas cristalinas e amorfas após a termoformação. Essas mudanças morfológicas têm implicações diretas na resistência mecânica dos alinhadores, afetando sua capacidade de suportar forças ortodônticas (TAVARES, 2017).

Quando se trata de materiais específicos, como o poliuretano, estudos têm evidenciado que as placas feitas desse material mantêm características semelhantes às observadas antes da termoformação. No entanto, é importante ressaltar que a resistência mecânica dos alinhadores pode ser diretamente afetada pelas mudanças morfológicas decorrentes do processo de termoformação (JINDAL, 2019).



A termoformação desempenha, assim, um papel crucial na fabricação de alinhadores ortodônticos personalizados, afetando não apenas a espessura, mas também as propriedades mecânicas, morfológicas e físicas dos materiais termoplásticos utilizados. Compreender esses efeitos é fundamental para garantir o desempenho clínico adequado dos alinhadores, bem como sua resistência e durabilidade ao longo do tratamento ortodôntico. Portanto, ao escolher materiais para a confecção de alinhadores, é essencial considerar não apenas suas propriedades iniciais, mas também seu comportamento durante o processo de termoformação. Essa abordagem contribuirá para a entrega de tratamentos ortodônticos mais eficazes e personalizados, atendendo às necessidades individuais de cada paciente (AUGUSTO, 2019; PRATTO, 2021; JINDAL, 2019; TAVARES, 2017; KUCINSKA-LIPKA, 2015; NUGROHO, 2021; NJUGUNA, 2004).

Enfatizando a forte evolução tecnológica na Ortodontia, acompanhamos os avanços de uma abordagem inovadora que vem ganhando destaque: a impressão 3D direta de alinhadores transparentes. 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 (TARTAGLIA, 2021).

A impressão 3D direta é uma abordagem complexa que permite um melhor controle da espessura do alinhador e, conseqüentemente, dos vetores de força usados para movimentação dentária. Atualmente, não há outros materiais aprovados no mercado que possam oferecer esse nível de controle.

Em conclusão, os estudos revisados indicam que a impressão 3D direta representa uma evolução promissora na fabricação de alinhadores transparentes. No entanto, encoraja-se 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.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escolha e produção de alinhadores ortodônticos são processos influenciados por uma série de fatores que transcendem as necessidades clínicas do paciente. Isso engloba desde a seleção criteriosa de materiais até o entendimento profundo das transformações que esses materiais experimentam durante o processo de termoformação.



Os polímeros termoplásticos desempenham um papel central na confecção desses dispositivos, pois sua natureza permite uma moldagem personalizada e a aplicação de forças ortodônticas. No entanto, a etapa crítica da termoformação, que finaliza a fabricação, exerce um impacto notável nas propriedades mecânicas e morfológicas desses materiais. Observa-se uma redução na espessura dos alinhadores, acompanhada de mudanças em sua estrutura, que podem resultar em uma menor resistência à tração e deformações irreversíveis. A espessura dos alinhadores e o módulo de elasticidade emergem como fatores críticos na administração das forças ortodônticas, ressaltando a importância de compreender esses aspectos para o sucesso do tratamento.

Ademais, a escolha entre o uso de alinhadores comerciais, a produção in-office ou a impressão 3D deve ser uma decisão cuidadosamente ponderada, levando em consideração as necessidades individuais do paciente, o diagnóstico ortodôntico e o planejamento do tratamento. A disponibilidade de tecnologias 3D, scanners e impressoras tornou a produção in-office mais acessível, conferindo aos ortodontistas um maior controle sobre o processo, além de reduzir custos e prazos. Apesar dos benefícios conhecidos da impressão 3D e de sua popularidade na odontologia, há uma limitação significativa de dados técnicos e clínicos na literatura em relação aos alinhadores transparentes impressos diretamente. No entanto, estudos recentes sugerem que os alinhadores impressos em 3D superam os fabricados por termoformação em termos de precisão, resistência à carga e deformação reduzida.

É imperativo que a pesquisa nesse campo continue a progredir, visando aprimorar tanto os materiais quanto as técnicas de fabricação de alinhadores ortodônticos. Isso contribuirá para elevar a eficácia e previsibilidade dos tratamentos ortodônticos com alinhadores, beneficiando tanto os pacientes quanto os profissionais da odontologia. Em última análise, a busca constante por melhorias nos materiais e técnicas é essencial para assegurar que a ortodontia continue evoluindo e proporcionando resultados cada vez mais eficazes e personalizados aos pacientes.

CONCLUSÃO

A fabricação de alinhadores ortodônticos é um processo complexo, no qual a termoformação desempenha um papel crucial na determinação das propriedades mecânicas, morfológicas e físicas dos materiais termoplásticos utilizados. Este estudo proporcionou uma compreensão aprofundada dos impactos da termoformação, destacando a influência direta dessa etapa na espessura dos alinhadores, sua resistência mecânica e capacidade de suportar forças ortodônticas. Compreender esses efeitos é essencial para garantir o



desempenho clínico adequado dos alinhadores ao longo do tratamento ortodôntico. Destaca-se ainda a importância contínua da pesquisa e do desenvolvimento na área, buscando constantemente avanços que beneficiem a prática clínica e atendam às necessidades individuais dos pacientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TARTAGLIA G, MAPELLI A. et al. Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities. *Materials* (Basel). 2021; 5-14.
2. CONDO R, PAZZINI L. et al. Mechanical properties of “two generations” of teeth aligners: Change analysis during oral permanence. *Dent Mater J*. 2018. 30-37 835-842.
3. SILVA J P P, CARNEIRO G K M. et al. Ortodontia Invisível – Uma alternativa estética. *Revista Saúde Multidisciplinar*, 2017. 175-190.
4. BARONE S, PAOLI A. et al. Mechanical and Geometrical Properties Assessment of Thermoplastic Materials for Biomedical Application. *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2017. 437-446.
5. THIESEN G, REGO M V N N. A movimentação dentária ortodôntica parte11: magnitudes de força ótima e taxa de movimento dentário. *Revista da Associação Paulista de Especialistas em Ortodontia - Ortopedia Facial*. 2005. 156-164.
6. SKAIK A, WEI X L. et al. Effects of time and clear aligner removal frequency of the force delivered by different polyethylene terephthalate glycol-modified materials determined with thin-film pressure sensors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2019. 98-107.
7. GOLD B P, DURAISAMY S, et al. Properties of Orthodontic Clear Aligner Materials - A Review. *J Evolution Med Dent Sci*. 2021. 3294-3300.
8. TOZLU M, OZDEMIR F. In-house Aligners: Why We Should Fabricate Aligners in Our Clinics? *Turkish Journal of Orthodontics*. 2021. 199-201.



9. JABER S T, HAJEER M, ADLER J R. The Effectiveness of In-house Clear Aligners and Traditional Fixed Appliances in Achieving Good Occlusion in Complex Orthodontic Cases: A Randomized Control Clinical Trial. *Cureus*, 2022. 14-22.
10. LEE S Y, KIM H. et al. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. *Scientific Reports*. 2022. 12-21.
11. RAJASEKARAN A, CHAUDHARI P K. Integrated manufacturing of direct 3d-printed clear aligners. *Front. Dent Med*. 2023. 3-12
12. GUPTA D K, TULI, A, JAIN, A. 3D printed material application in orthodontics. *Materialstoday Proceedings*. 2020. 1635-1642.
13. AUGUSTO A V C, OCAMPO Y M O. et al. Comparación de propiedades mecánicas de láminas poliméricas usadas en la fabricación de alineadores dentales. *Revista Semilleros*. 2019. 65-77.
14. PRATTO, I. Resistência Mecânica de Materiais Plásticos para Alinhadores Ortodônticos: Estudo Laboratorial. Dissertação de mestrado do Programa de Pós Graduação em Odontologia do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade estadual do Oeste do Paraná. 2021. 1-27.
15. JINDAL P, JUNEJA M. et al. Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2019. 5-12.
16. TAVARES F F C, ELZUBAIR A. et al. Influência da temperatura de recozimento na morfologia de um copoliéster (PETG). *Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros*. 2017. 32-41.
17. KUCINSKA-LIPKA J, GUBANSKA H, SIENKIEWICZ M. Fabrication of polyurethane and polyurethane based composite fibres by the electrospinning technique for soft tissue engineering of cardiovascular system. *Materials Science and Engineering*. 2015. 166-176.
18. NUGROHO W T, DONG Y. et al. Smart polyurethane composites for 3D or 4D printing: Generam-purpose use, sustainability and shape memory effect. *Composites*. 2021. 104-109.



19. NJUGUNA J, PIELICHOWSKI K. Review – Recent developments in polyurethane-based conducting composites. *Journal of Materials Science*. 2004. 4081-4094.