



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA

Arthur Luis Xavier Hering

Análise de polímeros utilizados na fabricação de alinhadores odontológicos:
revisão de literatura

Florianópolis
2025

Arthur Luis Xavier Hering

Análise de polímeros utilizados na fabricação de alinhadores odontológicos:
revisão de literatura

Trabalho de Conclusão do Curso de graduação em Odontologia, apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Campus Trindade, como parte dos requisitos para a obtenção do título de cirurgião-dentista.

Orientador(a): Prof. Dr. Daltro Enéas Ritter

Florianópolis

2025

Hering, Arthur Luis Xavier

Análise de polímeros utilizados na fabricação de
alinhadores odontológicos / Arthur Luis Xavier Hering ;
orientador, Daltro Enéas Ritter, 2026.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
da Saúde, Graduação em Odontologia, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Odontologia. 2. Odontologia. 3. Alinhadores. 4.
Polímeros. I. Ritter, Daltro Enéas. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Odontologia. III.
Título.

Arthur Luis Xavier Hering

Análise de polímeros utilizados na fabricação de alinhadores odontológicos:
revisão de literatura

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Graduação e aprovado em sua forma final pelo Curso em Odontologia.

Florianópolis 08 de Maio de 2026.

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Prof.(a) Daltro Enéas RitterDr.(a)

Orientador(a)

Prof.(a) Roberto Rocha Dr.(a)

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof.(a) Gustavo Zanardi

Florianópolis, 2026

RESUMO

Analisa-se, por meio de revisão narrativa da literatura, os principais polímeros utilizados na fabricação de alinhadores odontológicos e suas implicações no desempenho mecânico, físico-químico e biológico desses dispositivos. Realiza-se busca bibliográfica em PubMed, PubMed Central (PMC), SciELO e LILACS, ao longo do ano de 2025, com inclusão prioritária de estudos publicados nos últimos cinco anos e admissão excepcional de trabalhos seminais para fundamentação conceitual. Organiza-se a síntese de forma temática, abordando materiais termoplásticos empregados em alinhadores, com ênfase em PETG, poliuretanos termoplásticos, copolímeros, blends e estruturas multicamadas. Discute-se que o comportamento viscoelástico dos polímeros, expresso por relaxamento de tensão e fluência, influencia a manutenção de forças ao longo do tempo e pode afetar a previsibilidade clínica de cada etapa. Evidencia-se que a termoformagem e a espessura efetiva do alinhador modificam propriedades finais do dispositivo, contribuindo para variabilidade entre materiais e dificultando comparações quando há heterogeneidade metodológica. Analisa-se, ainda, o impacto do envelhecimento em meio bucal simulado, incluindo absorção de água, variações térmicas, alterações de rugosidade e mudanças ópticas, com potenciais repercussões estéticas e de higiene. Quanto à segurança biológica, discutem-se ensaios de biocompatibilidade e investigações sobre liberação de compostos, com necessidade de interpretação cautelosa diante de diferenças de protocolo. Conclui-se que não há superioridade universal de um único polímero, e reforça-se a importância de padronização de métodos e de estudos que integrem caracterização de materiais e desfechos clínicos.

Palavras-chave: alinhadores ortodônticos; polímeros; materiais termoplásticos; termoformagem; propriedades mecânicas; envelhecimento; biocompatibilidade.

ABSTRACT

This study analyzes, through a narrative literature review, the polymers used in the manufacture of orthodontic clear aligners and the relationship between their properties and the clinical performance of these devices. A bibliographic search was conducted in PubMed, PubMed Central (PMC), SciELO, and LILACS throughout 2025, prioritizing studies published within the last five years and exceptionally including seminal studies for conceptual grounding. The synthesis was organized into thematic axes addressing the main classes of thermoplastics used in aligners, with emphasis on PETG-based materials, thermoplastic polyurethanes, copolymers, polymer blends, and multilayer architectures, as well as processing-related aspects. The viscoelastic behavior of polymers, expressed by stress relaxation and creep, is discussed as a key factor governing time-dependent force decay and potentially affecting the predictability of planned tooth movements, especially when variations in thickness, coverage, and fit are considered. Thermoforming is highlighted as a critical step that alters microstructure, thickness distribution, and surface properties, thereby modifying stiffness, elastic recovery, and dimensional stability and contributing to heterogeneity across brands and methodological limitations among studies. The impact of aging under simulated oral conditions is also addressed, including water sorption, thermal variations, changes in surface roughness, staining, and optical changes, with potential consequences for esthetics, hygiene, and patient adherence. From a biological standpoint, evidence regarding biocompatibility, in vitro cytotoxicity, biofilm formation, and the potential release of chemical compounds is examined, emphasizing the need for cautious interpretation based on the tested material, extraction medium, and analytical method. It is concluded that no single polymer is universally superior and that clinical decisions should consider force maintenance, dimensional stability, and surface behavior, supporting methodological standardization and studies integrating material characterization with clinical outcomes.

Keywords: clear aligners; polymers; thermoplastic materials; physicommechanical properties; thermoforming; aging; biocompatibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de material multicamadas.....	22
Figura 2 – Esquema conceitual de relaxamento de tensão, caracterizado pela redução da tensão ao longo do tempo sob deformação constante ..	26
Figura 3 – Esquema conceitual de fluência, caracterizada pelo aumento da deformação ao longo do tempo sob tensão constante.....	27
Figura 4 – Queda de força de alinhadores em meio úmido (0 a 7 dias)	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre materiais poliméricos utilizados em alinhadores ortodônticos	24
Quadro 2 – Propriedades mecânicas e significado clínico em alinhadores ortodônticos.....	29
Quadro 3 – Eixos de avaliação biológica de alinhadores e implicações clínicas	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	14
2.1	ESTRATÉGIA DE BUSCA E FONTES DE INFORMAÇÃO	14
2.2	CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE	14
2.3	SELEÇÃO DOS ESTUDOS.....	15
2.4	EXTRAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES.....	15
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
3.1	ALINHADORES ORTODÔNTICOS: CONCEITOS E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO.....	16
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE ALINHADORES: VISÃO GERAL	17
3.3	POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS APLICADOS A ALINHADORES.....	18
3.3.1	PETG e derivados.....	19
3.3.2	Poliuretanos e copolímeros.....	20
3.3.3	Outros polímeros e blends utilizados em alinhadores	22
3.4	PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS RELEVANTES.....	25
3.4.1	Módulo de elasticidade, resistência e recuperação elástica	25
3.4.2	Relaxamento de tensão, fluência e estabilidade dimensional	26
3.4.3	Efeito da espessura do alinhador e variações de processamento	28
3.5	PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E ENVELHECIMENTO DO MATERIAL.....	29
3.5.1	Absorção de água e alterações térmicas.....	30
3.5.2	Rugosidade superficial, manchamento e alterações ópticas.....	30
3.6	ASPECTOS BIOLÓGICOS E SEGURANÇA DO MATERIAL	31
3.6.1	Biocompatibilidade e liberação de compostos	32
3.6.2	Interação com saliva, biofilme e higiene do paciente	33
3.7	IMPLICAÇÕES CLÍNICAS RELACIONADAS AO MATERIAL	34
3.7.1	Influência do polímero na entrega de força e previsibilidade	34
3.7.2	Limitações clínicas associadas ao desempenho do material	37
3.8	PERSPECTIVAS E TENDÊNCIAS FUTURAS EM MATERIAIS PARA ALINHADORES	37
4	DISCUSSÃO	40

4.1	SÍNTESE CRÍTICA DOS ACHADOS DO RECORTE TEMPORAL (ÚLTIMOS CINCO ANOS)	40
4.2	CONTRIBUIÇÕES DOS ESTUDOS SEMINAIS NA FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL	41
4.3	LACUNAS NA LITERATURA E IMPLICAÇÕES PARA PESQUISA E PRÁTICA CLÍNICA	43
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS.....	46
	ANEXO A – ATA DE DEFESA.....	50
	APÊNDICE A – GLOSSÁRIO	52

1 INTRODUÇÃO

Os alinhadores ortodônticos são dispositivos removíveis, confeccionados em materiais poliméricos transparentes, utilizados para promover movimentação dentária por meio de sequências programadas de trocas, constituindo uma alternativa aos aparelhos fixos em diversas indicações clínicas (Bichu et al., 2022). Nas últimas décadas, a expansão do tratamento ortodôntico com alinhadores esteve associada, entre outros fatores, à crescente demanda estética e ao interesse por terapias que favoreçam conforto e facilidade de higienização, aspectos frequentemente relatados como atrativos no contexto da adesão do paciente ao tratamento (Delgado et al., 2025).

O desempenho clínico dos alinhadores depende de múltiplos fatores, incluindo o planejamento digital, o desenho do dispositivo, a espessura e, de modo central, o material polimérico empregado na sua fabricação (Bichu et al., 2022). Estudos recentes indicam que alinhadores disponíveis comercialmente podem apresentar composições distintas, com predominância de copoliésteres como o politereftalato de etileno glicol-modificado (PETG), um derivado do PET modificado para favorecer processabilidade e transparência, e de poliuretanos (PU), frequentemente utilizados por conferirem combinação de flexibilidade e resistência, além de misturas e variações estruturais que influenciam propriedades como cristalinidade e resposta mecânica (Cenzato et al., 2024). Nesse cenário, a compreensão das características dos polímeros torna-se relevante para interpretar a entrega de força ortodôntica, a estabilidade dimensional e a previsibilidade clínica dos movimentos planejados (Delgado et al., 2025).

Embora o uso clínico dos alinhadores esteja consolidado, ainda existe heterogeneidade entre os materiais e variabilidade nos resultados reportados na literatura, especialmente quando se consideram propriedades mecânicas tempo-dependentes típicas de polímeros, como relaxamento de tensão e comportamento viscoelástico, que podem impactar a manutenção da força ao longo do uso (Delgado et al., 2025; Liu et al., 2025). Além disso, o ambiente bucal impõe desafios de envelhecimento do material, incluindo exposição à umidade, variações de temperatura, pigmentação e interações com saliva e biofilme, com potenciais repercussões em propriedades ópticas e físico-químicas (Cenzato et al., 2024; Delgado et al., 2025). Soma-se a isso a discussão sobre segurança e

biocompatibilidade, com estudos avaliando a liberação de compostos como bisfenóis a partir de diferentes materiais utilizados em alinhadores e dispositivos relacionados, o que reforça a necessidade de síntese crítica das evidências (Katras et al., 2021; Özkan et al., 2023).

Considerando a rápida evolução dos materiais termoplásticos voltados à Ortodontia e a disponibilidade crescente de produtos com diferentes composições, torna-se pertinente revisar criticamente a literatura recente para organizar o conhecimento sobre os principais polímeros utilizados na fabricação de alinhadores e suas implicações potenciais no desempenho clínico (Bichu et al., 2022; Delgado et al., 2025). Um recorte concentrado nos últimos cinco anos favorece a atualidade do trabalho e permite discutir tendências e inovações recentes, ao mesmo tempo em que estudos seminais podem contribuir de forma complementar para a fundamentação conceitual dos princípios materiais envolvidos (Bichu et al., 2022).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de uma revisão narrativa da literatura, os principais polímeros utilizados na fabricação de alinhadores odontológicos, abordando suas propriedades físico-mecânicas e possíveis implicações clínicas na Ortodontia. Os objetivos específicos incluem identificar os polímeros descritos na literatura recente, descrever propriedades relevantes para uso ortodôntico, analisar a influência do material no desempenho clínico e apontar limitações e perspectivas futuras.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, desenvolvida com o objetivo de analisar os principais polímeros empregados na fabricação de alinhadores odontológicos e discutir suas propriedades físico-mecânicas e possíveis implicações clínicas na Ortodontia.

2.1 ESTRATÉGIA DE BUSCA E FONTES DE INFORMAÇÃO

A busca bibliográfica foi realizada ao longo do ano de 2025, nas bases de dados PubMed, PubMed Central (PMC), SciELO e LILACS. Utilizaram-se descritores e palavras-chave relacionados ao tema, combinados por operadores booleanos AND e OR, com adaptação conforme a sintaxe de cada base.

No PubMed, foi utilizada, como estratégia principal, a seguinte combinação (string de busca): (clear aligner OR clear aligners OR orthodontic aligner OR aligner) AND (polymer OR thermoplastic OR polyurethane OR PETG OR thermoplastic material OR dental material)

Quando aplicável, foram empregados termos controlados (MeSH) e filtros disponíveis na base para restringir os resultados ao recorte temporal estabelecido. Adicionalmente, realizou-se busca manual a partir das listas de referências dos artigos selecionados, desde que os estudos identificados também se enquadrassem nos critérios de inclusão.

2.2 CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

Foram incluídos artigos publicados nos últimos cinco anos, em relação ao período de busca, disponíveis na íntegra, nos idiomas português e inglês, que abordassem diretamente polímeros utilizados na confecção de alinhadores odontológicos e/ou aspectos relacionados às propriedades do material relevantes ao uso ortodôntico, tais como características estruturais, comportamento mecânico (por exemplo, elasticidade, resistência, relaxamento de tensão e fluência), envelhecimento, absorção de água, liberação de compostos e estabilidade dimensional.

Foram excluídas publicações duplicadas, resumos sem acesso ao texto completo, trabalhos cujo foco não estivesse relacionado aos materiais poliméricos dos alinhadores (por exemplo, estudos exclusivamente sobre biomecânica clínica sem discussão do material), bem como relatos de caso isolados e textos opinativos sem base técnico-científica. Também foram excluídos estudos que abordassem materiais odontológicos sem relação com alinhadores ortodônticos.

Além do recorte temporal estabelecido, foram admitidos, de forma excepcional, estudos clássicos e seminais que contribuíssem para a fundamentação conceitual do tema, desde que apresentassem relevância direta para a compreensão dos polímeros utilizados em alinhadores odontológicos.

2.3 SELEÇÃO DOS ESTUDOS

A seleção foi conduzida em três etapas: leitura de títulos, leitura de resumos e leitura na íntegra dos artigos potencialmente elegíveis. Os estudos incluídos foram aqueles que, após a leitura completa, apresentaram aderência ao objetivo do trabalho e ao recorte temporal estabelecido.

2.4 EXTRAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES

As informações foram extraídas de forma padronizada, considerando: tipo de polímero (quando informado), método de fabricação (quando descrito), propriedades avaliadas (mecânicas, físico-químicas e/ou biológicas), principais resultados, limitações apontadas pelos autores e implicações clínicas discutidas. Em seguida, os achados foram organizados de maneira descritiva e temática, permitindo comparação entre materiais e síntese crítica da literatura recente sobre polímeros aplicados a alinhadores odontológicos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 ALINHADORES ORTODÔNTICOS: CONCEITOS E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Os alinhadores ortodônticos são dispositivos removíveis confeccionados a partir de polímeros transparentes, planejados para promover movimentação dentária por meio de uma sequência programada de etapas. Cada alinhador é projetado para induzir pequenas alterações de posição, de modo que o conjunto das etapas resulte na movimentação dentária prevista no planejamento digital (Bichu et al., 2023; Delgado et al., 2025).

Do ponto de vista biomecânico, a inserção do alinhador sobre os dentes gera deformação do material. A tendência do polímero em retornar à forma original está associada à liberação de forças e momentos, cuja magnitude e estabilidade dependem, entre outros fatores, da geometria do alinhador, extensão de cobertura, qualidade de adaptação, espessura e propriedades do material polimérico utilizado (Delgado et al., 2025; Cenzato et al., 2024).

A previsibilidade de determinados movimentos pode variar conforme o desenho do alinhador e o uso de recursos auxiliares. Attachments, recortes e estratégias de desenho são frequentemente empregados para aumentar retenção e controle tridimensional, sobretudo em situações nas quais o contato superficial do alinhador com a coroa dentária pode ser insuficiente para expressar movimentos mais complexos (Bichu et al., 2023).

Além dos determinantes geométricos e de planejamento, o material exerce influência relevante porque muitos polímeros utilizados em alinhadores apresentam comportamento viscoelástico, com relaxamento de tensão e fluência ao longo do tempo. Esse comportamento pode contribuir para redução progressiva da força entregue durante o período de uso, afetando a estabilidade da carga aplicada e, consequentemente, a eficiência clínica em cada etapa (Delgado et al., 2025; Liu et al., 2025).

Adicionalmente, o ambiente bucal pode modificar o desempenho do material. Umidade, temperatura, exposição a soluções e agentes de limpeza, além de pigmentação e interação com saliva e biofilme, são condições que podem impactar

propriedades mecânicas, ópticas, químicas e morfológicas, de forma variável entre materiais e marcas comerciais (Arabpour et al., 2025; Staderini et al., 2025).

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE ALINHADORES: VISÃO GERAL

Os alinhadores são produzidos, predominantemente, a partir de polímeros termoplásticos, com destaque para materiais à base de PETG e poliuretanos termoplásticos (TPU), além de misturas e formulações proprietárias que podem diferir quanto à estrutura, cristalinidade, transparência e resposta mecânica após processamento (Cenzato et al., 2024; Bichu et al., 2023; Delgado et al., 2025).

O processamento é um ponto crítico, pois a termoformagem pode alterar propriedades mecânicas e físico-químicas do material. Assim, o desempenho clínico do alinhador não depende apenas do polímero “em si”, mas também de como ele é processado e das condições de uso e envelhecimento simuladas ou observadas nos estudos, o que dificulta comparações diretas quando metodologias são heterogêneas (Cenzato et al., 2024; Delgado et al., 2025).

Entre os materiais mais discutidos, polímeros à base de PETG são frequentemente associados a boa transparência e facilidade de processamento, enquanto materiais baseados em TPU tendem a apresentar características de elasticidade e durabilidade que podem ser desejáveis em determinadas aplicações. Entretanto, ambos podem sofrer alterações após envelhecimento, com impacto em parâmetros mecânicos, ópticos e de superfície, o que reforça a necessidade de interpretar resultados à luz do protocolo experimental e do tempo de exposição (Cenzato et al., 2024; Staderini et al., 2025).

Do ponto de vista clínico, propriedades como módulo de elasticidade, resistência, recuperação elástica, estabilidade dimensional, relaxamento de tensão e fluência são relevantes porque se relacionam à entrega e manutenção de força ao longo do uso. Estudos recentes têm proposto métodos comparativos para estimar ou prever o relaxamento de tensão de diferentes materiais, com o objetivo de orientar a seleção de materiais e interpretar diferenças de desempenho entre marcas (Liu et al., 2025; Delgado et al., 2025).

Além das propriedades mecânicas e ópticas, aspectos de segurança do material também têm sido avaliados na literatura recente. Entre os pontos discutidos,

destaca-se a possibilidade de liberação de compostos químicos a partir de materiais poliméricos em contato com o meio bucal, especialmente quando submetidos a condições que simulam envelhecimento, variações térmicas e exposição a soluções. Nesse contexto, alguns estudos investigam a presença e a liberação de bisfenóis, substâncias associadas a determinados plásticos e que têm sido objeto de avaliação quanto a potenciais efeitos biológicos dependendo do tipo de material e do método analítico empregado. Essas análises devem ser interpretadas com cautela, uma vez que resultados podem variar conforme o polímero, o protocolo experimental (meio de imersão, tempo e temperatura) e o método de detecção utilizado (Özkan et al., 2023; Peter et al., 2023; Ferreira et al., 2025).

3.3 POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS APLICADOS A ALINHADORES

Os materiais termoplásticos empregados na confecção de alinhadores ortodônticos compõem um grupo heterogêneo de polímeros, frequentemente comercializados em formulações proprietárias, com variações de composição, estrutura e comportamento após processamento. Termoplásticos são polímeros que amolecem quando aquecidos e podem ser moldados por processos como a termoformagem, técnica na qual uma lâmina plástica aquecida é adaptada sobre um modelo dentário para produzir o alinhador. Assim, além da composição do material, o processamento influencia o produto final, podendo modificar microestrutura, espessura efetiva e propriedades de superfície (Cenzato et al., 2024; Delgado et al., 2025; Staderini et al., 2025).

Entre as classes mais discutidas na literatura recente, destacam-se materiais à base de poli(tereftalato de etileno) glicol-modificado (PETG) e poliuretanos termoplásticos (TPU), além de copolímeros e blends. Copolímeros são materiais formados por mais de um tipo de monômero, enquanto blends correspondem a misturas físicas de polímeros; ambos podem ser utilizados para ajustar propriedades como transparência, rigidez, resistência ao rasgamento e manutenção de força ao longo do uso (Cenzato et al., 2024; Delgado et al., 2025).

A interpretação dos resultados deve considerar que, após a termoformagem, o alinhador é exposto ao ambiente bucal, onde fatores como umidade, temperatura e variações de pH podem afetar o material. Além disso, polímeros apresentam comportamento viscoelástico, isto é, combinam respostas elásticas e viscosas. Na

prática, isso significa que a força inicialmente aplicada tende a diminuir ao longo do tempo por mecanismos como relaxamento de tensão e fluência, o que pode influenciar o desempenho clínico em cada etapa de uso (Delgado et al., 2025; Liu et al., 2025; Arabpour et al., 2025).

3.3.1 PETG e derivados

O poli(tereftalato de etileno) glicol-modificado (PETG) é amplamente utilizado na fabricação de alinhadores devido à sua transparência, facilidade de processamento por termoformagem e disponibilidade comercial em diferentes espessuras. O PETG é um copoliéster obtido pela modificação do poli(tereftalato de etileno) com unidades de glicol, o que reduz a cristalinidade e aumenta a processabilidade, favorecendo a formação de placas mais transparentes e com melhor capacidade de conformação durante a termoformagem (Cenzato et al., 2024; Delgado et al., 2025).

Estudos recentes descrevem que propriedades do PETG podem ser alteradas após a termoformagem e durante o envelhecimento em condições que simulam o uso clínico. Envelhecimento, nesse contexto, refere-se à exposição do material a água, variação térmica e tempo de uso, o que pode modificar parâmetros como rigidez, resistência e estabilidade dimensional. Essas mudanças variam conforme a formulação do material, o protocolo experimental e a forma como o alinhador foi processado (Cenzato et al., 2024; Staderini et al., 2025).

Do ponto de vista biomecânico, parâmetros como módulo de elasticidade, resistência à deformação e recuperação elástica são relevantes para estimar a capacidade do alinhador em entregar forças quando inserido e manter parte dessa carga ao longo do tempo. O módulo de elasticidade expressa, de forma simplificada, o quanto o material “resiste” a deformar sob força; materiais mais rígidos tendem a gerar forças iniciais maiores, embora isso não signifique necessariamente melhor desempenho clínico. Evidências sugerem que alinhadores baseados em PETG podem apresentar redução progressiva de tensão sob condições de uso, relacionada ao comportamento viscoelástico e à influência do meio úmido e da temperatura, reforçando a importância de considerar relaxamento de tensão e fluência na interpretação do desempenho (Delgado et al., 2025; Liu et al., 2025).

Outro ponto relevante é que a espessura do alinhador e variações decorrentes da termoformagem podem afetar a magnitude inicial de força e sua dissipação ao

longo do tempo. Isso ocorre porque pequenas diferenças de espessura alteram a rigidez global do dispositivo, influenciando a expressão de movimentos planejados. Assim, o controle do processo de fabricação é determinante para consistência entre etapas e entre diferentes marcas ou lotes de material (Cenzato et al., 2024; Arabpour et al., 2025).

No que se refere às características de superfície e propriedades ópticas, o ambiente bucal pode promover alterações associadas à absorção de água, manchamento e aumento de rugosidade. Rugosidade superficial corresponde a irregularidades microscópicas na superfície, que podem favorecer acúmulo de biofilme e reduzir transparência. Em materiais à base de PETG, esses efeitos podem variar conforme a formulação e o protocolo de envelhecimento utilizado, incluindo exposição a pigmentos, ciclos térmicos e agentes de limpeza, o que sugere cautela na comparação entre estudos e ressalta a necessidade de padronização metodológica em investigações futuras (Staderini et al., 2025; Arabpour et al., 2025).

3.3.2 Poliuretanos e copolímeros

Os poliuretanos termoplásticos, frequentemente referidos pela sigla TPU, constituem uma classe de polímeros amplamente utilizada em alinhadores devido à combinação entre resistência mecânica e flexibilidade. TPU é um material formado por “segmentos” com características distintas: partes mais rígidas (que contribuem para resistência e estabilidade) e partes mais flexíveis (que contribuem para elasticidade). Essa estrutura segmentada é relevante porque influencia tanto a forma como o material deforma e recupera sua forma quanto o modo como suas propriedades podem variar com temperatura, umidade e tempo de uso (Delgado et al., 2025; Cenzato et al., 2024).

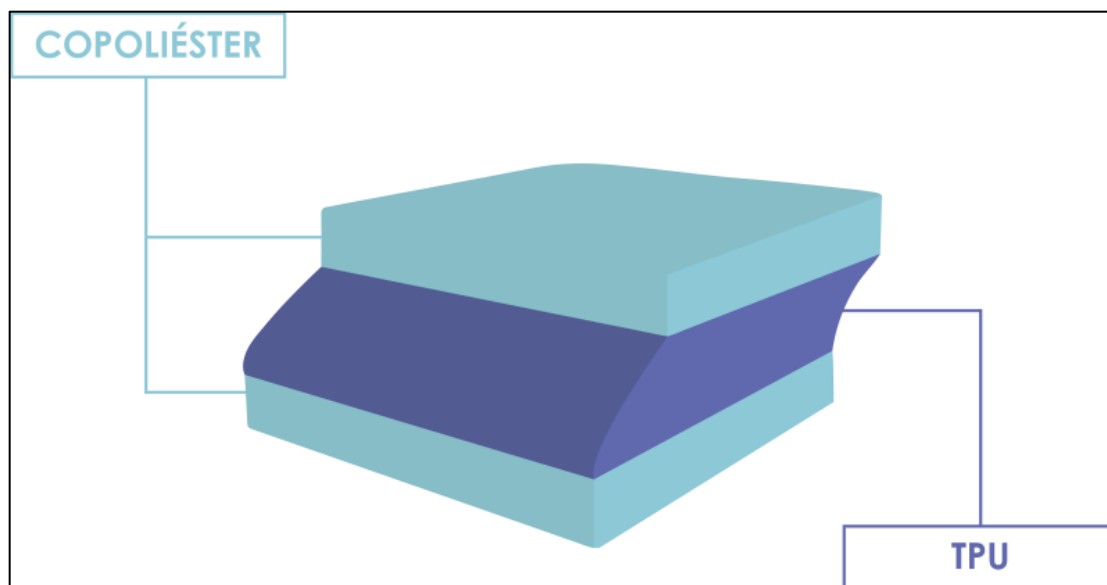
Em comparação com materiais à base de PETG, alinhadores baseados em TPU podem apresentar comportamento mecânico diferente, especialmente em propriedades tempo-dependentes. Em polímeros viscoelásticos, a força aplicada tende a reduzir com o tempo mesmo sem alteração do posicionamento dentário, fenômeno conhecido como relaxamento de tensão. Quando esse relaxamento é acentuado, a força entregue ao longo dos dias pode cair mais rapidamente, o que é clinicamente relevante porque cada alinhador é utilizado por um período determinado antes da troca (Liu et al., 2025). Estudos comparativos têm avaliado esse

comportamento em diferentes materiais e marcas, sugerindo que o padrão de relaxamento pode variar conforme a composição do TPU e as condições de envelhecimento simuladas (Delgado et al., 2025; Arabpour et al., 2025).

Outro aspecto relevante é a influência do processamento. A termoformagem pode alterar a distribuição de espessura e induzir mudanças microestruturais no polímero, com impacto em rigidez e estabilidade dimensional. Em materiais como TPU, que possuem estrutura segmentada, variações de temperatura durante o processamento e durante o uso podem afetar a mobilidade molecular e, consequentemente, a resposta mecânica, de modo que diferenças entre placas, protocolos e marcas devem ser consideradas na interpretação dos estudos (Cenzato et al., 2024; Staderini et al., 2025).

Além do TPU, a literatura descreve copolímeros e materiais multicamadas desenvolvidos com a proposta de combinar propriedades desejáveis em um único alinhador, como maior rigidez inicial, manutenção de força ao longo do tempo e melhor resistência ao envelhecimento. Materiais multicamadas são estruturas em que diferentes camadas de polímeros são combinadas, com a intenção de que cada camada contribua com uma função, por exemplo, uma camada externa mais resistente e uma interna mais flexível. Embora essa abordagem seja promissora, os resultados variam conforme o material e os métodos de teste, tornando essencial descrever com precisão o tipo de polímero, a condição de envelhecimento e os parâmetros mecânicos avaliados ao comparar estudos (Bichu et al., 2023; Cenzato et al., 2024; Delgado et al., 2025).

Figura 1 – Esquema de material multicamadas.



Fonte: Smiller Alinhadores (s. d.).

No contexto clínico, a discussão sobre TPU e copolímeros deve considerar não apenas a força inicial gerada pelo alinhador, mas também a sua manutenção ao longo do tempo, a estabilidade dimensional e o comportamento de superfície. O envelhecimento em meio úmido, a exposição a variações térmicas e o contato com agentes químicos presentes em enxaguatórios ou soluções de limpeza podem alterar propriedades de superfície, afetando transparência e potencial de retenção de biofilme. Esses fatores podem impactar tanto a aceitabilidade estética quanto a higiene do dispositivo, reforçando a necessidade de investigação contínua sobre a relação entre composição polimérica e desempenho em condições clínicas simuladas (Staderini et al., 2025; Arabpour et al., 2025).

3.3.3 Outros polímeros e blends utilizados em alinhadores

Além de materiais à base de PETG e poliuretanos termoplásticos, a literatura descreve o uso de outros polímeros e combinações de materiais na fabricação de alinhadores, frequentemente associados a formulações proprietárias. Em muitos casos, a composição exata não é completamente divulgada pelos fabricantes, o que limita comparações diretas entre marcas e reforça a importância de interpretar resultados com base nos métodos de caracterização utilizados em cada estudo (Bichu et al., 2023; Delgado et al., 2025).

Entre os materiais mencionados, aparecem variações de copoliésteres e polímeros com diferentes graus de cristalinidade. Cristalinidade é a organização das cadeias poliméricas em regiões mais “ordenadas”; em termos práticos, alterações nesse parâmetro podem influenciar transparência, rigidez e resistência ao desgaste. Materiais menos cristalinos tendem a ser mais transparentes, enquanto maior cristalinidade pode aumentar rigidez, embora também possa afetar a estética e o comportamento sob termoformagem (Cenzato et al., 2024; Staderini et al., 2025).

Os blends, por sua vez, são misturas físicas de dois ou mais polímeros, utilizadas para ajustar propriedades sem necessariamente criar um novo copolímero. A motivação para empregar blends em alinhadores geralmente envolve buscar equilíbrio entre transparência, resistência ao rasgamento, estabilidade dimensional e manutenção de força durante o tempo de uso. Entretanto, misturas poliméricas podem apresentar separação de fases, isto é, formação de regiões com composição diferente dentro do mesmo material, o que pode influenciar a resposta mecânica e a degradação em ambiente úmido. Por esse motivo, estudos de caracterização frequentemente avaliam não apenas propriedades mecânicas, mas também morfologia e comportamento após envelhecimento (Delgado et al., 2025; Arabpour et al., 2025).

Outra abordagem descrita na literatura é o uso de materiais multicamadas. Materiais multicamadas consistem na combinação de duas ou mais camadas de polímeros com funções complementares, por exemplo, uma camada com maior rigidez e outra com maior elasticidade, com o objetivo de melhorar desempenho biomecânico e resistência ao envelhecimento. Apesar de promissora, essa estratégia pode apresentar desafios, como delaminação, que é a separação entre camadas ao longo do tempo, especialmente quando há absorção de água, variação térmica e tensões repetidas durante inserção e remoção do alinhador. Assim, resultados devem ser interpretados considerando o desenho do ensaio, as condições de envelhecimento e o tipo de análise empregada (Bichu et al., 2023; Cenzato et al., 2024; Staderini et al., 2025).

Do ponto de vista clínico, a relevância desses materiais alternativos e combinações não se limita à força inicial gerada pelo alinhador. A estabilidade dimensional e a manutenção de força ao longo do tempo são pontos centrais, uma vez que o comportamento viscoelástico pode levar à redução gradual da tensão aplicada. Além disso, fatores como absorção de água, manchamento e alterações de

superfície influenciam transparência e higiene, podendo afetar aceitação do paciente e potencial retenção de biofilme (Arabpour et al., 2025; Staderini et al., 2025).

Por fim, a heterogeneidade de formulações e protocolos de ensaio observada na literatura recente sugere a necessidade de padronização metodológica para permitir comparações mais consistentes entre materiais. Estudos que descrevem com clareza o tipo de polímero, a forma de processamento, a espessura, o protocolo de envelhecimento e os métodos de caracterização tendem a oferecer maior aplicabilidade para a discussão clínica e para o avanço do desenvolvimento de materiais voltados a alinhadores ortodônticos (Cenzato et al., 2024; Delgado et al., 2025).

Com base nas características descritas para os principais materiais empregados em alinhadores ortodônticos, apresenta-se uma síntese comparativa visando facilitar a visualização das diferenças e pontos de atenção entre classes poliméricas e arquiteturas de materiais (Quadro 1).

Quadro 1 – Comparação entre materiais poliméricos utilizados em alinhadores ortodônticos

Material	Estrutura Polimérica	Vantagens	Limitações	Implicações Clínicas
PETG	Copoliéster (Polietileno Tereftalato Tereftalato Glicol)	Alta transparência; facilidade de termoformagem; ampla disponibilidade comercial	Alteração de propriedades após termoformagem e envelhecimento intraoral; decréscimo rápido da força dissipada; suscetibilidade variável ao manchamento	Exerce maior força inicial; o desempenho é diretamente dependente da espessura do material, do processamento e da degradação no ambiente oral.
TPU	Poliuretano Termoplástico (Polímero segmentado)	Excelente equilíbrio entre flexibilidade e resistência; boa adaptação anatômica em diversas formulações	O relaxamento de tensão varia consideravelmente conforme a formulação; alta sensibilidade aos processos de fabricação e ensaios mecânicos	A capacidade de manutenção da força ao longo do tempo é determinante; tende a proporcionar maior conforto e melhor adaptação ao paciente.
Multicamadas	Sobreposição de polímeros com propriedades mecânicas distintas	Otimização do equilíbrio entre a rigidez inicial e a manutenção contínua da força	Risco inerente de delaminação; a eficácia depende da arquitetura das camadas; escassez de comparações padronizadas na literatura	Pode melhorar substancialmente o equilíbrio entre a força inicial e sua manutenção, variando conforme o sistema utilizado e o desgaste intraoral.
Blends / Copolímeros Proprietários	Misturas físicas ou copolímeros exclusivos de fabricantes	Permite o ajuste fino de rigidez e elasticidade; possibilita o alcance de desempenhos mecânicos customizados	Omissão frequente da composição exata por questões de patente; alta heterogeneidade nos resultados das pesquisas	O desempenho clínico é estritamente dependente da formulação específica; requer interpretação crítica e individualizada dos ensaios.

Fonte: elaborado pelo autor, com base na literatura revisada (Bichu et al., 2022; Cenzato et al., 2024; Delgado et al., 2025).

3.4 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS RELEVANTES

As propriedades físico-mecânicas dos polímeros utilizados em alinhadores ortodônticos são determinantes para compreender como o dispositivo se comporta durante a inserção, uso contínuo e remoção, bem como para interpretar a estabilidade das forças ortodônticas ao longo do tempo. Em alinhadores, essas propriedades devem ser analisadas considerando o caráter viscoelástico dos polímeros, isto é, a combinação entre resposta elástica (deformação reversível) e resposta viscosa (deformação dependente do tempo), além das condições de envelhecimento em meio úmido e sob variações térmicas (Delgado et al., 2025; Liu et al., 2025).

3.4.1 Módulo de elasticidade, resistência e recuperação elástica

O módulo de elasticidade, também denominado módulo de Young, é uma medida que expressa a rigidez do material, indicando o quanto ele resiste à deformação quando submetido a uma força. Em termos clínicos, materiais com maior módulo tendem a gerar forças iniciais maiores ao serem assentados sobre os dentes, embora isso não implique necessariamente melhor eficiência, pois a magnitude e estabilidade dessas forças dependem de outros fatores, como espessura, adaptação e relaxamento de tensão (Cenzato et al., 2024; Arabpour et al., 2025).

A resistência mecânica refere-se à capacidade do material de suportar tensões sem fraturar ou sofrer deformações permanentes. Em alinhadores, esse aspecto é relevante porque o dispositivo é submetido a ciclos repetidos de inserção e remoção, além de forças funcionais durante mastigação e fala. Assim, resistência ao rasgamento, à fratura e à fadiga podem influenciar a durabilidade do alinhador e sua capacidade de manter forma e adaptação ao longo do período de uso (Staderini et al., 2025; Delgado et al., 2025).

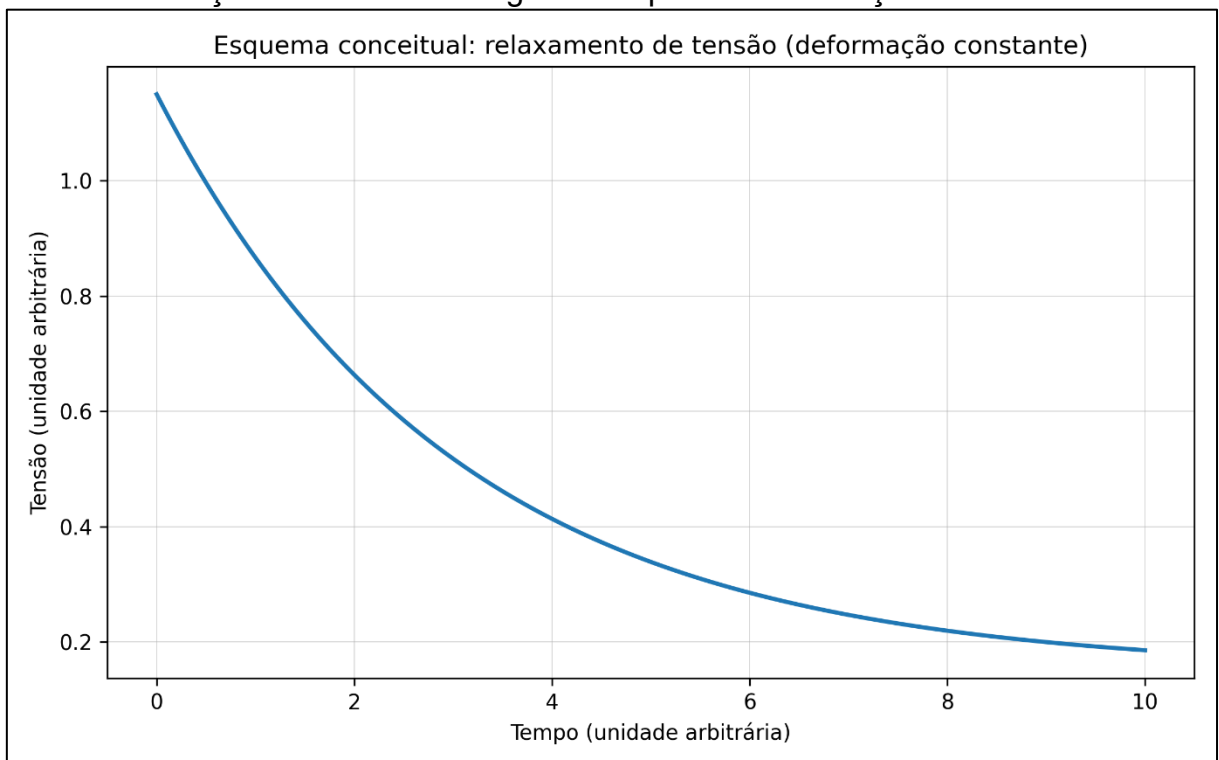
A recuperação elástica, por sua vez, descreve a capacidade do material retornar à sua forma original após deformação. Em alinhadores, esse parâmetro está relacionado à eficiência de transmissão de forças planejadas, pois a deformação elástica inicial é parte do mecanismo de geração de força. Contudo, em materiais viscoelásticos, parte da deformação pode se tornar dependente do tempo, reduzindo a recuperação completa e contribuindo para perda de tensão ao longo do uso, o que

reforça a necessidade de avaliar esses parâmetros em protocolos que considerem condições clínicas simuladas (Liu et al., 2025).

3.4.2 Relaxamento de tensão, fluência e estabilidade dimensional

Relaxamento de tensão é a redução progressiva da tensão interna de um material quando ele permanece sob uma deformação constante ao longo do tempo. Em alinhadores, isso pode ser entendido como a queda gradual da força entregue após a inserção, mesmo que o alinhador continue assentado nos dentes. Esse fenômeno é frequentemente observado em materiais termoplásticos utilizados em Ortodontia e tem sido investigado em ensaios in vitro com diferentes materiais comerciais, demonstrando que a intensidade e a velocidade de relaxamento podem variar de acordo com o tipo de polímero e com o protocolo experimental (Albertini et al., 2022).

Figura 2 – Esquema conceitual de relaxamento de tensão, caracterizado pela redução da tensão ao longo do tempo sob deformação constante

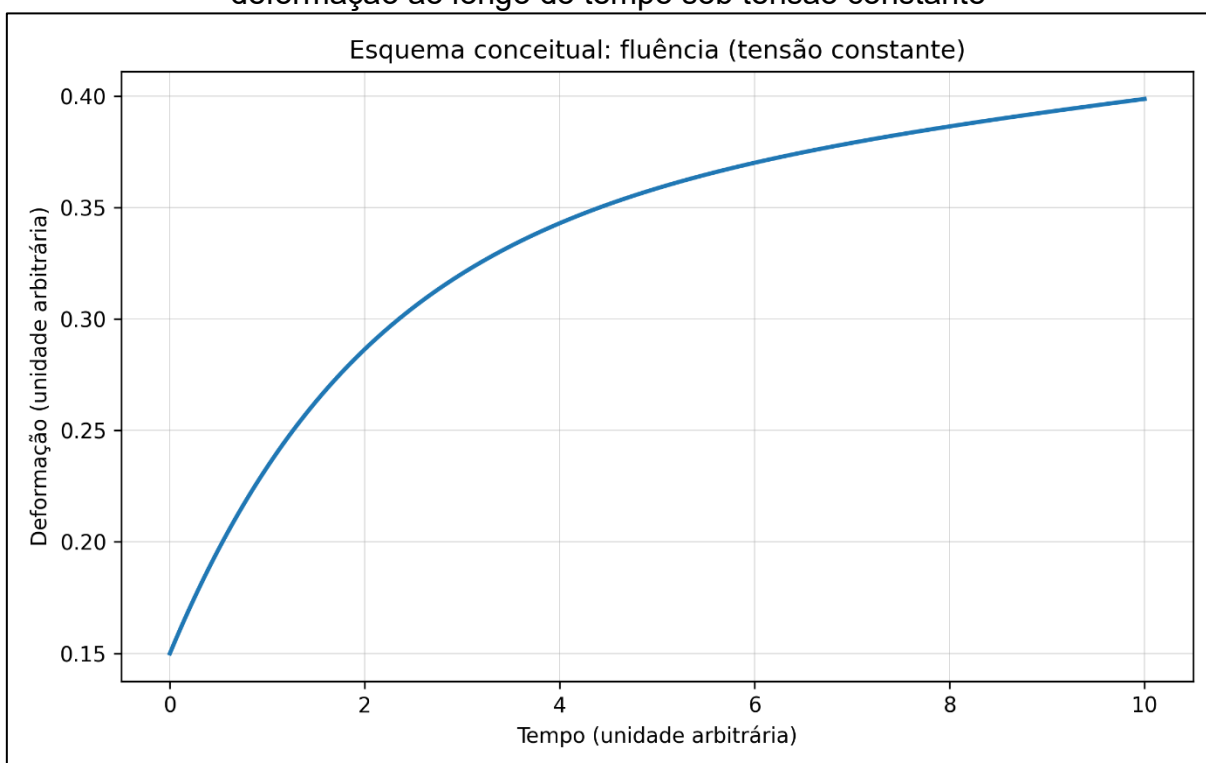


Nota: unidades em escala arbitrária, com finalidade didática.

Fonte: elaborado pelo autor.

A fluência, por sua vez, corresponde ao aumento progressivo da deformação quando o material é submetido a uma tensão constante. Em termos práticos, enquanto o relaxamento de tensão descreve a queda de força ao longo do tempo (deformação fixa), a fluência descreve a deformação que “avança” com o tempo (tensão fixa). Ambos são comportamentos viscoelásticos e ajudam a explicar por que o desempenho biomecânico do alinhador pode mudar entre o momento da inserção e os dias subsequentes de uso, principalmente quando se considera a permanência do material em ambiente úmido e sob variações térmicas (Delgado et al., 2025).

Figura 3 – Esquema conceitual de fluência, caracterizada pelo aumento da deformação ao longo do tempo sob tensão constante



Nota: unidades em escala arbitrária, com finalidade didática

Fonte: elaborado pelo autor.

A estabilidade dimensional refere-se à capacidade do alinhador manter sua forma e dimensões ao longo do tempo, sem sofrer alterações que comprometam adaptação e retenção. Na prática clínica, perda de estabilidade dimensional pode impactar assentamento marginal e contato com attachments, com possível repercussão na expressão de movimentos planejados. Estudos que avaliam envelhecimento e uso simulados indicam que processos como termoformagem e envelhecimento podem alterar propriedades mecânicas e parâmetros relacionados à

estabilidade do material, reforçando a importância de discutir esses efeitos de forma integrada (Bhate et al., 2024; Staderini et al., 2024; Delgado et al., 2025).

Nos últimos anos, também têm sido propostos métodos para estimar ou prever o relaxamento de tensão em materiais de alinhadores, com o objetivo de aproximar resultados laboratoriais de situações clínicas e auxiliar comparações entre materiais. Esses trabalhos ressaltam que, além de comparar “força inicial”, é necessário considerar o comportamento em longo prazo, pois diferenças no relaxamento podem significar manutenção de força por mais tempo ou queda mais rápida ao longo do período de uso de cada alinhador (Liu et al., 2025).

3.4.3 Efeito da espessura do alinhador e variações de processamento

A espessura do alinhador é um determinante importante do comportamento mecânico do dispositivo, pois influencia a rigidez global do sistema. Em geral, maior espessura tende a aumentar rigidez e a magnitude de força inicial gerada na inserção, enquanto menor espessura tende a reduzir rigidez e forças iniciais, embora a resposta final dependa também do desenho do alinhador, do material e do grau de adaptação ao modelo dentário (Delgado et al., 2025).

O processamento, especialmente a termoformagem, pode alterar a espessura efetiva em diferentes regiões do alinhador, resultando em áreas mais finas e mais espessas após a adaptação ao molde. Termoformagem é o processo de aquecer uma lâmina termoplástica até seu ponto de amolecimento e conformá-la sobre um modelo, o que pode modificar microestrutura, distribuição de espessura, rugosidade e propriedades mecânicas. Estudos recentes analisaram como a termoformagem e o envelhecimento afetam parâmetros como módulo de flexão e rugosidade superficial, sugerindo que parte da variabilidade de desempenho entre alinhadores pode decorrer não apenas da composição do polímero, mas também das mudanças induzidas pelo processamento e pelo uso (Bhate et al., 2024; Staderini et al., 2024).

Além da termoformagem, condições de envelhecimento, como armazenamento em água e exposição a saliva artificial, podem influenciar propriedades relacionadas à dureza, absorção de água e comportamento de deformação dependente do tempo. A absorção de água é relevante porque pode atuar como um plastificante, aumentando mobilidade das cadeias poliméricas e, potencialmente, influenciando a resposta viscoelástica. Estudos com foco em

armazenamento em água e testes de propriedades mecânicas em materiais termoformados destacam que o meio de exposição e o tempo podem alterar o comportamento do material, o que é essencial para interpretar resultados e compará-los entre estudos (Puchert et al., 2025).

Por fim, a literatura recente também tem ampliado a discussão sobre alternativas de fabricação, incluindo alinhadores produzidos por impressão 3D. Embora essa abordagem represente um campo em crescimento, ela reforça um ponto central para a presente revisão: o desempenho final do alinhador depende tanto do material quanto do processo de fabricação e das condições de envelhecimento, exigindo que estudos descrevam com precisão a composição, o protocolo de processamento e os parâmetros avaliados para permitir sínteses comparáveis (Delgado et al., 2025).

Quadro 2 – Propriedades mecânicas e significado clínico em alinhadores ortodônticos

Propriedade	O que mede (Síntese)	Efeito esperado no alinhador	Relevância Clínica (exemplo)
Módulo de elasticidade (rigidez)	Resistência à deformação elástica (tensão/deformação).	Maior módulo tende a aumentar a força inicial; menor módulo tende a reduzir força inicial.	Pode influenciar magnitude de força em cada etapa e necessidade de ajustes no planejamento.
Resistência mecânica	Capacidade de suportar tensões sem fratura/deformação permanente.	Maior resistência reduz risco de fissuras, rasgos e deformações irreversíveis.	Impacta durabilidade do alinhador, principalmente com inserções/remoções repetidas.
Recuperação elástica	Capacidade de retornar à forma original após deformação.	Recuperação alta favorece entrega de força planejada; recuperação baixa pode reduzir expressão do movimento.	Relaciona-se ao controle de movimentos e à consistência entre trocas.
Relaxamento de tensão	Queda de tensão ao longo do tempo sob deformação constante.	Força diminui durante o uso (mesmo sem trocar o alinhador).	Pode reduzir efetividade em dias finais de uso e aumentar necessidade de refinamentos.
Fluência	Aumento da deformação ao longo do tempo sob tensão constante.	Pode contribuir para perda de adaptação/forma em uso prolongado.	Pode afetar assentamento marginal e contato com attachments.
Estabilidade dimensional	Manutenção de forma e dimensões ao longo do tempo.	Menor estabilidade pode causar folgas, deformações e pior retenção.	Relaciona-se à previsibilidade clínica e ao encaixe do alinhador durante a etapa.
Espessura efetiva (pós-termoformagem)	Espessura final após processamento; pode variar por região.	Áreas mais finas tendem a ser menos rígidas e entregar menor força; áreas mais espessas, maior rigidez.	Ajuda a explicar variações de força e desempenho entre marcas, lotes e regiões do mesmo alinhador.

Fonte: elaborado pelo autor, com base na literatura revisada (Bichu et al., 2022; Cenzato et al., 2024; Delgado et al., 2025; Albertini et al., 2022; Liu et al., 2025).

3.5 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E ENVELHECIMENTO DO MATERIAL

Além do comportamento mecânico, os alinhadores podem sofrer alterações físico-químicas durante o uso. Envelhecimento, neste contexto, corresponde às mudanças graduais do material decorrentes da exposição contínua à umidade, temperatura, variações de pH, substâncias presentes em alimentos e bebidas, além de soluções de higienização. Essas alterações podem impactar tanto o desempenho

biomecânico quanto a estética, influenciando estabilidade dimensional, transparência, rugosidade superficial e integridade do material (Delgado, 2025; Mei, 2024).

3.5.1 Absorção de água e alterações térmicas

A absorção de água é um fenômeno no qual moléculas de água penetram na matriz polimérica. Em termos práticos, isso pode atuar como um efeito plastificante, isto é, aumentar a mobilidade das cadeias do polímero e modificar propriedades como rigidez e resistência ao longo do tempo. Em alinhadores, a absorção de água e a permanência do material em meio úmido, frequentemente a 37 °C, são condições relevantes porque simulam o ambiente bucal e podem contribuir para alterações de propriedades mecânicas e de superfície (Delgado, 2025; Asefi et al., 2024).

Outro fator importante são as variações térmicas. Alterações de temperatura podem influenciar a resposta viscoelástica, acelerar processos de envelhecimento e modificar a estabilidade do material, especialmente quando o paciente utiliza o alinhador durante ingestão de bebidas quentes ou frias. Estudos que investigam materiais termoformados e/ou impressos diretamente têm utilizado protocolos de imersão em água a 37 °C e diferentes tempos de exposição para avaliar mudanças mecânicas em condições fisiológicas simuladas, reforçando a necessidade de interpretar resultados considerando tempo e temperatura como variáveis determinantes (Oyonarte et al., 2026).

Do ponto de vista metodológico, a literatura recente destaca que diferenças nos protocolos de envelhecimento (meio de imersão, duração, temperatura, presença de agentes químicos) podem gerar resultados distintos mesmo para materiais semelhantes, o que dificulta comparações diretas entre estudos e reforça a importância de descrição detalhada das condições experimentais (Delgado, 2025; Mei, 2024).

3.5.2 Rugosidade superficial, manchamento e alterações ópticas

A rugosidade superficial corresponde às irregularidades microscópicas na superfície do alinhador. O aumento de rugosidade pode ter relevância clínica por dois motivos principais: pode comprometer a estética (reduzindo a sensação de

transparência) e pode favorecer retenção de biofilme, uma vez que superfícies mais irregulares tendem a facilitar a adesão microbiana (Mei, 2024; Eslami et al., 2024).

O manchamento e as alterações ópticas envolvem mudanças na cor e na capacidade de passagem de luz pelo material. Transmitância luminosa é a medida de quanta luz atravessa o material, enquanto estabilidade de cor se refere à manutenção da cor original ao longo do tempo. Estudos *in vitro* têm avaliado a estabilidade de cor e alterações de superfície de alinhadores quando expostos a pigmentos, como soluções contendo curcumina, demonstrando que diferentes materiais podem apresentar comportamento distinto quanto a alteração de cor e mudanças superficiais após exposição (He et al., 2025). Em contexto semelhante, também há investigações sobre a estabilidade de transparência de materiais termoplásticos após exposição a substâncias corantes, reforçando o impacto potencial de hábitos alimentares no aspecto estético do alinhador (Shimizu et al., 2025).

Além disso, comparações entre alinhadores termoformados e alinhadores produzidos por impressão direta têm incluído avaliação de rugosidade, transmitância, estabilidade de cor e formação de biofilme, evidenciando que o método de fabricação pode influenciar propriedades de superfície e ópticas do dispositivo, com possíveis repercussões clínicas (Chen et al., 2025). Em materiais impressos diretamente, também foram observadas alterações em parâmetros como rugosidade e porosidade após períodos de serviço intraoral. Porosidade, nesse caso, corresponde à presença de microcavidades que podem se formar ou se evidenciar na superfície, o que pode contribuir para maior retenção de biofilme e alteração estética (Eslami et al., 2024).

3.6 ASPECTOS BIOLÓGICOS E SEGURANÇA DO MATERIAL

dores permanecem em contato prolongado com tecidos orais, saliva e biofilme, o que torna relevante discutir segurança biológica e possíveis interações entre o material e o meio bucal. Nessa perspectiva, a literatura recente tem concentrado investigações em três frentes principais: biocompatibilidade (efeitos sobre células e tecidos), liberação de substâncias químicas (leachables) e características de superfície que favoreçam ou dificultem adesão microbiana e formação de biofilme (Kolenc et al., 2025; Wendl et al., 2025; Lo et al., 2024).

3.6.1 Biocompatibilidade e liberação de compostos

Biocompatibilidade refere-se à capacidade de um material desempenhar sua função em contato com o organismo sem provocar efeitos adversos inaceitáveis. Em estudos laboratoriais, essa avaliação costuma incluir ensaios de citotoxicidade, que medem se extratos do material ou o próprio material em contato com células reduzem viabilidade celular ou induzem alterações compatíveis com dano biológico. Em materiais utilizados para alinhadores, pesquisas *in vitro* avaliaram a resposta de células do ligamento periodontal humano expostas a materiais termoplásticos, comparando lâminas originais e materiais após termoformagem, o que é relevante porque o processamento pode modificar a superfície e a composição disponível para interação com o meio (Lo et al., 2024).

De forma geral, os resultados descritos por Lo et al. (2024) indicaram que diferentes materiais de alinhadores podem apresentar respostas biológicas distintas quando avaliados por ensaios de citotoxicidade, e que a etapa de termoformagem pode influenciar esses achados, possivelmente por alterações na superfície e no perfil de compostos disponíveis no material após o processamento. Os autores destacam que, embora os testes *in vitro* sejam úteis para triagem e comparação entre materiais sob condições controladas, a interpretação deve considerar o protocolo experimental empregado (tipo de célula, tempo de exposição e forma de preparo do extrato), bem como limitações de extrapolação direta para o ambiente clínico.

Outro eixo de investigação é a liberação de compostos a partir do polímero. Leachables são substâncias que podem migrar do material para o meio ao longo do tempo, especialmente em condições de imersão, variação térmica e envelhecimento, podendo incluir monômeros residuais, aditivos e subprodutos de degradação. Em Ortodontia, um tópico recorrente é a avaliação de bisfenóis, substâncias associadas a alguns plásticos e frequentemente classificadas como potenciais desreguladores endócrinos, isto é, compostos capazes de interferir em vias hormonais em determinadas condições e doses. Revisões sistemáticas e estudos experimentais investigaram a liberação de bisfenol A (BPA) a partir de materiais termoplásticos usados em alinhadores, destacando que resultados variam conforme material, meio de extração, tempo, temperatura e método analítico empregado (Peter et al., 2023; Özkan et al., 2023; Katras et al., 2021).

De forma geral, a literatura recomenda cautela na interpretação desses achados por duas razões principais: a heterogeneidade metodológica entre estudos e a necessidade de contextualizar os valores observados com base nas condições experimentais e na relevância clínica. Assim, a discussão sobre segurança do material deve descrever claramente o tipo de material avaliado, se foi analisado antes ou após termoformagem, o meio de incubação, o tempo de exposição e a técnica laboratorial utilizada para detecção e quantificação (Peter et al., 2023; Wendl et al., 2025).

3.6.2 Interação com saliva, biofilme e higiene do paciente

Biofilme é uma comunidade de microrganismos aderida a uma superfície, envolta por uma matriz produzida pelos próprios microrganismos. Em alinhadores, as propriedades de superfície do material, como rugosidade e energia superficial, podem influenciar a adesão inicial de bactérias e leveduras e a maturação do biofilme. Por esse motivo, estudos recentes têm comparado adesão microbiana e formação de biofilme em diferentes sistemas de alinhadores, observando variações dependentes do tempo e do tipo de material, o que sugere que diferenças entre composições e acabamentos superficiais podem ter implicações para higiene e odor durante o uso (Bozkurt et al., 2025).

Além da comparação entre materiais, também há investigações sobre como o tratamento com alinhadores pode se relacionar a mudanças na composição do biofilme supra e subgengival ao longo do tempo. Embora alguns estudos indiquem padrões de alteração distintos quando comparados a aparelhos fixos, a literatura reforça que a higiene e o controle de placa continuam sendo fatores críticos, especialmente em pacientes com risco periodontal, e que mudanças microbiológicas podem ocorrer durante o tratamento (Monterde et al., 2025).

No campo de controle do biofilme, investigações *in vitro* avaliaram a formação de biofilmes de microrganismos relevantes em Ortodontia (como *Streptococcus* e *Candida*) sobre diferentes materiais de alinhadores e a influência de soluções de higiene. Esses estudos sugerem que o controle do biofilme depende simultaneamente da composição química do agente de higiene e das propriedades físico-químicas do material do alinhador, reforçando que recomendações clínicas devem considerar tanto o produto utilizado quanto o tipo de material em uso pelo paciente (Alexa et al., 2025).

Quadro 3 – Eixos de avaliação biológica de alinhadores e implicações clínicas

Eixo de avaliação	Como costuma ser avaliado	O que o resultado sugere	Implicação clínica
Citotoxicidade (biocompatibilidade)	Ensaio <i>in vitro</i> com células expostas ao material ou a extratos do material.	Potencial de causar efeito adverso celular em condições de teste; depende de protocolo e material.	Reforça necessidade de seleção criteriosa e interpretação cautelosa dos testes.
Compostos lixiviáveis (leachables)	Extração em meios simulados e identificação/quantificação (p. ex., cromatografia).	Possível migração de aditivos, monômeros residuais e subprodutos de degradação.	Apoia discussão de segurança, especialmente sob envelhecimento e uso prolongado.
Bisfenóis (p. ex., BPA)	Ensaio de liberação sob condições controladas (tempo/temperatura/meio).	Possível liberação conforme material e método; resultados variam entre estudos.	Orienta cautela em recomendações e na comunicação com pacientes sensíveis ao tema.
Adesão microbiana e biofilme	Formação de biofilme <i>in vitro</i> e/ou avaliação microbiológica durante uso.	Risco de maior colonização em superfícies mais retentivas; varia entre materiais e higiene.	Sustenta reforço de higiene e monitoramento periodontal durante tratamento.
Superfície (rugosidade/energia superficial)	Medições de rugosidade e testes de molhabilidade/energia superficial.	Superfícies mais rugosas e com maior molhabilidade podem de biofilme/pigmentos.	Pode influenciar estética (manchamento) e higiene; impacta orientação ao paciente.
Efeito de agentes de higiene	Exposição a soluções/colutórios avaliação de superfície, cor e propriedades mecânicas.	Alguns protocolos podem alterar rugosidade, cor e propriedades do material.	Apoia escolha de limpeza compatíveis com o material do alinhador.

Fonte: elaborado pelo autor, com base na literatura revisada (Lo et al., 2024; Peter et al., 2023; Özkan et al., 2023; Ferreira et al., 2025; Wendl et al., 2025; Bozkurt et al., 2025; Alexa et al., 2025; Belanche Monterde et al., 2025).

3.7 IMPLICAÇÕES CLÍNICAS RELACIONADAS AO MATERIAL

3.7.1 Influência do polímero na entrega de força e previsibilidade

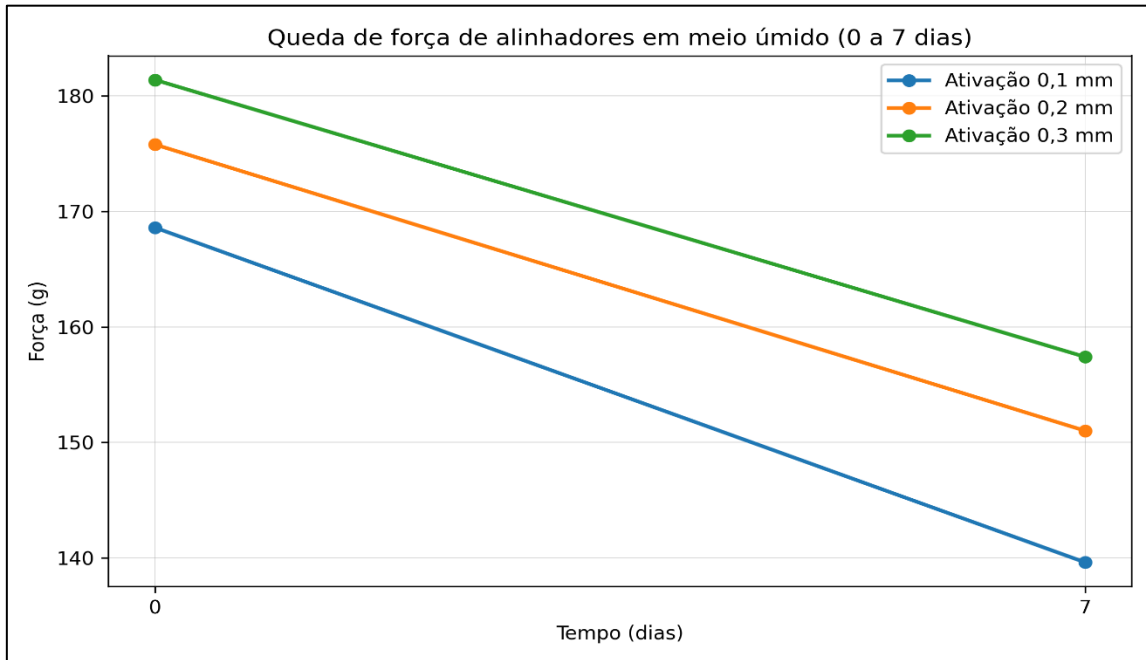
A previsibilidade, no contexto dos alinhadores, corresponde ao grau de concordância entre o movimento dentário planejado digitalmente e o movimento efetivamente obtido clinicamente. Embora essa previsibilidade dependa de múltiplos fatores (planejamento, desenho, adesão ao uso e execução clínica), o material do alinhador interfere diretamente na entrega e na manutenção de forças ao longo do tempo, pois sua resposta mecânica determina como a carga aplicada na inserção se comporta durante os dias de uso (Bichu et al., 2022; Delgado et al., 2025).

Quando a previsibilidade é expressa como porcentagem do movimento planejado que foi efetivamente alcançado, a literatura indica variação relevante conforme o tipo de movimento e o dente envolvido. Em revisão sistemática que sintetizou estudos clínicos entre 2020 e 2025, observou-se que distalização e movimentos rotacionais tendem a atingir, em média, aproximadamente 75–78% do planejado (por exemplo, acurácia ponderada de 75,6% para distalização e cerca de 78% para rotações), enquanto expansão transversal, tipping/torque e redução de sobremordida apresentam previsibilidade moderada (aproximadamente 53–62%); já

os movimentos verticais, especialmente a intrusão, mostram menor confiabilidade, com relatos de valores muito baixos em cenários específicos, como intrusão de incisivos inferiores em torno de 9,5% do planejado em um dos estudos incluídos (Drohomyretska et al., 2025). De forma complementar, em estudo clínico que avaliou rotações, a previsibilidade global do movimento rotacional foi de 78,6% na arcada mandibular e 75,0% na arcada maxilar, com pior desempenho observado em segundos molares, reforçando que a porcentagem alcançada depende também da unidade dentária e das condições do caso (D'Antò et al., 2024).

Em estudos laboratoriais, observa-se de forma consistente que as forças geradas pelos alinhadores tendem a diminuir gradualmente com o tempo, mesmo sob condições simuladas de uso em meio úmido. Esse fenômeno está relacionado ao comportamento viscoelástico do polímero e pode variar conforme o tipo de material, a espessura e o nível de ativação, influenciando a quantidade de força residual disponível após alguns dias (Chen et al., 2023; Xiang et al., 2021). Em simulação de ambiente oral por 7 dias, Chen et al. (2023) observaram redução da força corretiva do dia inicial ao dia 7 de aproximadamente 17,2% para ativação de 0,1 mm (de 168,6 g para 139,6 g), 14,1% para 0,2 mm (de 175,8 g para 151,0 g) e 13,2% para 0,3 mm (de 181,4 g para 157,4 g), com queda significativa já no primeiro dia e tendência de declínio progressivo ao longo do período. Já Xiang et al. (2021), avaliando alinhadores PETG imersos em saliva artificial por até 14 dias, evidenciaram redução expressiva da força ao longo do tempo, com queda mais acentuada no PETG convencional e maior estabilidade relativa no material PETG modificado, especialmente nos períodos mais prolongados de imersão.

Figura 4 – Queda de força de alinhadores em meio úmido (0 a 7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, com base em Chen et al. (2023).

A espessura do alinhador e a composição do material também influenciam não apenas a magnitude de força inicial, mas a distribuição de forças e o padrão de entrega mecânica em diferentes regiões. Em termos clínicos, isso ajuda a explicar por que alinhadores com materiais e espessuras distintas podem apresentar comportamentos diferentes mesmo quando o desenho do caso é semelhante, reforçando que a escolha do material pode impactar a eficiência de expressão de movimentos em cada etapa (Elshazly et al., 2024).

Outro ponto relevante é que a termoformagem pode alterar a resposta do material. Como o alinhador final não é apenas “a lâmina original”, mas um dispositivo termoformado, mudanças induzidas pelo processamento podem afetar rigidez, adaptação e estabilidade dimensional, influenciando o padrão de força entregue. Assim, estudos que comparam materiais devem considerar se a análise foi realizada antes ou após termoformagem e sob quais condições de envelhecimento (Cenzato et al., 2024; Nugent et al., 2025).

Além disso, estudos comparativos e revisões que abordam materiais monolayer e multilayer sugerem que a arquitetura do material pode influenciar a queda de força ao longo do tempo. Materiais multicamadas são estruturados em mais de uma camada com propriedades distintas, e essa estratégia é apresentada como tentativa de equilibrar força inicial, manutenção de carga e resistência ao

envelhecimento. Ainda assim, os achados variam conforme material e protocolo experimental, o que exige cautela ao extrapolar resultados para a prática clínica (Macri et al., 2022; Delgado et al., 2025).

3.7.2 Limitações clínicas associadas ao desempenho do material

As limitações clínicas associadas ao material podem se manifestar de diferentes formas. Em primeiro lugar, a queda de força ao longo do uso pode reduzir a efetividade de determinadas etapas, especialmente se o alinhador não mantiver carga suficiente durante o período programado. Isso pode contribuir para necessidade de refinamentos, ajustes no planejamento e, em alguns casos, extensão do tempo de tratamento (Albertini et al., 2022; Chen et al., 2023).

Em segundo lugar, alterações físico-químicas e de superfície podem impactar adesão do paciente, estética e higiene. Aumento de rugosidade e alterações ópticas podem reduzir transparência e favorecer retenção de biofilme, o que tem implicações para conforto, odor e necessidade de protocolos de higienização mais rigorosos, sobretudo em tratamentos prolongados (Staderini et al., 2025; Macri et al., 2022).

Por fim, a heterogeneidade de materiais comercialmente disponíveis e a falta de padronização em protocolos experimentais dificultam comparações diretas. Estudos podem utilizar diferentes espessuras, diferentes condições de envelhecimento e métodos de ensaio distintos, produzindo resultados que nem sempre são plenamente comparáveis. Esse cenário limita a construção de recomendações clínicas universais e reforça a necessidade de descrição metodológica detalhada e de pesquisas com desenhos comparativos mais homogêneos (Cenzato et al., 2024; Nugent et al., 2025).

3.8 PERSPECTIVAS E TENDÊNCIAS FUTURAS EM MATERIAIS PARA ALINHADORES

O desenvolvimento de materiais para alinhadores ortodônticos tem avançado em duas direções complementares: a otimização de termoplásticos já consolidados (como copoliésteres e poliuretanos) e a introdução de novas abordagens de fabricação e modificação de superfície, com o objetivo de melhorar manutenção de

força, estabilidade dimensional, resistência ao envelhecimento e desempenho estético ao longo do uso (Delgado et al., 2025; Bichu et al., 2022).

Uma tendência recorrente é o uso de materiais multicamadas e formulações com blends e copolímeros com arquitetura ajustada para equilibrar rigidez inicial e comportamento viscoelástico. A justificativa é que, ao combinar componentes com propriedades distintas, seria possível reduzir a queda de força por relaxamento de tensão e melhorar estabilidade do dispositivo durante o período de uso. Entretanto, a literatura recente indica que os resultados ainda dependem fortemente da composição específica, do processamento e das condições de envelhecimento, o que reforça a necessidade de protocolos comparativos mais padronizados para avaliar se ganhos laboratoriais se traduzem em benefícios clínicos mensuráveis (Macri et al., 2022; Albertini et al., 2022; Cenzato et al., 2024).

Outra linha em expansão é a modificação de superfície. Modificação de superfície consiste em técnicas destinadas a alterar a camada mais externa do material (sem necessariamente mudar todo o polímero), buscando reduzir rugosidade, melhorar resistência ao manchamento e diminuir adesão microbiana. Essas estratégias incluem tratamentos físicos e químicos e recobrimentos (coatings), que são camadas finas aplicadas sobre a superfície para conferir propriedades específicas, como maior hidrofobicidade ou menor energia superficial. Embora promissoras, essas abordagens precisam ser avaliadas com cautela, pois o desempenho depende da durabilidade do recobrimento no ambiente bucal e de possíveis efeitos na biocompatibilidade e na integridade do material com o tempo (Bozkurt et al., 2025; Alexa et al., 2025).

Também têm ganhado espaço métodos alternativos de fabricação, especialmente a impressão 3D direta de alinhadores. Impressão 3D direta, nesse contexto, refere-se à produção do alinhador como peça final impressa, em vez de fabricar primeiro um modelo e termoformar uma lâmina sobre ele. A principal promessa é maior reprodutibilidade, possibilidade de ajuste fino de espessura em regiões específicas e redução de etapas laboratoriais. No entanto, a literatura indica que materiais impressos podem apresentar desafios próprios, como variação de propriedades mecânicas conforme parâmetros de impressão e pós-cura, além de diferenças em rugosidade, porosidade superficial e estabilidade óptica em comparação com materiais termoformados, exigindo avaliação crítica antes de

extrapolações clínicas amplas (Chen et al., 2025; Eslami et al., 2024; Oyonarte et al., 2026).

Do ponto de vista de segurança, espera-se que pesquisas futuras ampliem a padronização de ensaios de liberação de compostos e biocompatibilidade, aproximando protocolos laboratoriais das condições reais de uso. Isso inclui melhor definição de meios de incubação, tempo de exposição, temperatura, ciclos térmicos e métodos analíticos, para permitir comparação mais consistente entre materiais e marcas. Essa padronização é particularmente relevante quando se discutem substâncias potencialmente liberadas por polímeros sob envelhecimento, pois a heterogeneidade metodológica ainda é um dos principais limitadores para sínteses conclusivas (Peter et al., 2023; Özkan et al., 2023; Wendl et al., 2025).

Por fim, uma necessidade transversal apontada na literatura recente é aproximar resultados laboratoriais de desfechos clínicos. Em outras palavras, além de medir propriedades mecânicas e físico-químicas isoladas, torna-se relevante investigar como essas propriedades se relacionam com previsibilidade de movimentos, necessidade de refinamentos, tempo total de tratamento e experiência do paciente. Trabalhos que integram caracterização de materiais, envelhecimento simulado e avaliação clínica tendem a oferecer maior aplicabilidade para tomada de decisão e para orientar o desenvolvimento de novos polímeros voltados à Ortodontia com alinhadores (Delgado et al., 2025; Nugent et al., 2025).

4 DISCUSSÃO

4.1 SÍNTESE CRÍTICA DOS ACHADOS DO RECORTE TEMPORAL (ÚLTIMOS CINCO ANOS)

Os estudos recentes analisados convergem ao indicar que o desempenho clínico dos alinhadores não depende apenas do planejamento digital e do desenho do dispositivo, mas também do comportamento do polímero após processamento e durante o uso em ambiente bucal. De forma geral, a literatura reforça que materiais termoplásticos empregados em alinhadores apresentam resposta viscoelástica, o que implica redução progressiva da força entregue ao longo do tempo por relaxamento de tensão e possibilidade de deformação dependente do tempo (fluência), especialmente sob condições de umidade e temperatura semelhantes às do meio oral (Albertini et al., 2022; Delgado et al., 2025; Liu et al., 2025).

Outro ponto consistente é que a termoformagem, por alterar espessura efetiva, microestrutura e propriedades de superfície, pode modificar o desempenho do alinhador em relação à lâmina original. Assim, a comparação entre materiais exige cautela, pois estudos podem avaliar materiais antes e após termoformagem, com protocolos distintos de envelhecimento e métodos de ensaio diferentes, dificultando sínteses conclusivas e comparações diretas entre marcas e formulações (Cenzato et al., 2024; Bhate et al., 2024; Nugent et al., 2025). No mesmo sentido, a espessura do alinhador aparece como determinante relevante, influenciando rigidez, magnitude de força inicial e comportamento ao longo do tempo, sendo frequente a observação de que variações de espessura decorrentes do processamento podem contribuir para variabilidade de forças entre regiões do mesmo alinhador e entre dispositivos de diferentes fabricantes (Delgado et al., 2025; Puchert et al., 2025).

No que se refere às classes de materiais, a literatura recente descreve o uso predominante de copoliésteres (como PETG e derivados) e poliuretanos termoplásticos (TPU), além de copolímeros, blends e materiais multicamadas. Embora estudos sugiram tendências distintas entre essas classes quanto a rigidez, elasticidade e manutenção de força, os resultados permanecem dependentes das formulações proprietárias e das condições de ensaio. Assim, a discussão atual não permite afirmar superioridade universal de um tipo de polímero, mas reforça que materiais diferentes podem apresentar padrões diferentes de relaxamento de tensão

e de resposta ao envelhecimento, o que é clinicamente relevante na definição do tempo de uso e na previsibilidade de cada etapa (Cenzato et al., 2024; Liu et al., 2025; Arabpour et al., 2025).

Quanto às propriedades físico-químicas, os achados apontam que o ambiente bucal pode contribuir para alterações de superfície e ópticas, com potencial aumento de rugosidade, redução de transparência e manchamento após exposição a pigmentos e a soluções de higiene. Como a estética e a higiene são fatores centrais na adesão do paciente ao tratamento com alinhadores, esse conjunto de evidências destaca que a escolha do material e as recomendações de uso e higienização devem considerar a susceptibilidade do polímero a alterações ao longo do tempo, especialmente em tratamentos prolongados (Staderini et al., 2025; He et al., 2025; Shimizu et al., 2025).

No campo biológico, a literatura recente tem ampliado a investigação sobre biocompatibilidade e segurança, incluindo ensaios de citotoxicidade e estudos sobre liberação de compostos. Um tema recorrente é a análise de bisfenóis (como BPA), que são substâncias associadas a determinados plásticos e investigadas por possíveis efeitos biológicos. Os resultados, entretanto, variam de forma relevante conforme o material avaliado, o protocolo de extração e o método analítico, de modo que a interpretação deve ser cuidadosa e contextualizada às condições experimentais e às limitações de extrapolação para a clínica (Katrass et al., 2021; Peter et al., 2023; Özkan et al., 2023). Além disso, estudos sobre biofilme sugerem que propriedades de superfície podem influenciar adesão microbiana e que protocolos de higiene devem ser discutidos considerando simultaneamente o material do alinhador e o produto utilizado pelo paciente (Bozkurt et al., 2025; Alexa et al., 2025; Monterde et al., 2025).

4.2 CONTRIBUIÇÕES DOS ESTUDOS SEMINAIS NA FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL

Embora o recorte principal desta revisão privilegie publicações dos últimos cinco anos, estudos seminais são necessários para sustentar três bases conceituais que estruturam a interpretação dos achados recentes: (1) viscoelasticidade de polímeros, (2) efeito do processamento (especialmente a termoformagem) nas propriedades finais do alinhador e (3) biomecânica da ativação e do sistema de forças/momentos produzido pelos alinhadores. Esses pilares explicam por que

resultados contemporâneos sobre manutenção de força, estabilidade dimensional, envelhecimento e previsibilidade clínica variam entre materiais e protocolos, e permitem interpretar de forma mais robusta as tendências observadas na literatura recente.

No campo da viscoelasticidade, a literatura clássica de mecânica e reologia de polímeros descreve que a resposta mecânica de materiais poliméricos é dependente do tempo e de condições ambientais, de modo que fenômenos como relaxamento de tensão e fluência são esperados quando um polímero permanece sob deformação ou carga por períodos prolongados (Ferry, 1980; Findley; Lai; Onaran, 1976). Essa fundamentação é diretamente aplicável aos alinhadores, pois a força ortodôntica resulta da deformação do material na inserção e tende a diminuir com o tempo de uso, mesmo sem alteração do posicionamento dentário. Assim, os estudos seminais fornecem a lógica mecânica que sustenta os achados recentes sobre queda de força e variabilidade entre materiais, além de justificar a necessidade de avaliar propriedades tempo-dependentes, e não apenas a força inicial.

Quanto ao efeito do processamento, estudos seminais e análises anteriores ao recorte recente já apontavam que a termoformagem pode alterar propriedades físicas e mecânicas de termoplásticos usados em dispositivos odontológicos, por envolver aquecimento e deformação durante a conformação, com potenciais mudanças em microestrutura, distribuição de espessura e características superficiais. Uma análise sistemática multiescala sobre os efeitos da termoformagem em materiais termoplásticos odontológicos reforçou que o processo pode modificar parâmetros mecânicos e físicos, e que parte da variabilidade de desempenho pode decorrer do estado final do material (alinhador termoformado) e não apenas da lâmina original (Ryu et al., 2018). Esses fundamentos ajudam a interpretar criticamente estudos recentes que comparam marcas e materiais, pois diferenças metodológicas no protocolo de termoformagem e no envelhecimento simulado podem produzir resultados não diretamente comparáveis.

Por fim, na biomecânica da ativação, estudos experimentais clássicos aplicados aos alinhadores demonstraram que o sistema de forças e momentos depende do tipo de movimento, da geometria dentária, da espessura e do material, além do desenho do alinhador e do uso de recursos auxiliares. Hahn et al. (2010) mensuraram forças produzidas durante torque de incisivo com diferentes materiais, evidenciando influência do polímero no comportamento mecânico mesmo com

espessura constante. Simon et al. (2014) quantificaram forças e momentos em movimentos como torque de incisivos, derrotação e distalização, demonstrando variações entre alinhadores individuais e séries, além de influência de attachments e elementos de design na transferência de força (Hahn et al., 2010; Simon et al., 2014). Em paralelo, estudos clínicos seminais também contribuíram por estabelecerem formas objetivas de avaliar a previsibilidade do tratamento, comparando movimentos planejados e obtidos e demonstrando que a acurácia varia conforme o tipo de movimento, reforçando que limitações biomecânicas e materiais precisam ser consideradas no planejamento (Kravitz et al., 2009; Grünheid et al., 2017; Haouli et al., 2020). Dessa forma, os estudos seminais não substituem a evidência recente, mas sustentam os mecanismos e critérios que explicam por que, mesmo com avanços em materiais, a previsibilidade permanece dependente da interação entre material, processamento, ativação e desenho biomecânico.

4.3 LACUNAS NA LITERATURA E IMPLICAÇÕES PARA PESQUISA E PRÁTICA CLÍNICA

Uma limitação recorrente observada na literatura é a heterogeneidade metodológica. Diferentes estudos utilizam materiais de marcas distintas com composições não totalmente divulgadas, espessuras variadas, condições divergentes de termoformagem, protocolos de envelhecimento não uniformes (tempo, temperatura, meio de imersão, ciclos térmicos) e métodos de ensaio mecânico distintos. Essa variabilidade dificulta comparações diretas e limita a construção de recomendações clínicas generalizáveis, apontando a necessidade de padronização de protocolos, especialmente para avaliação de relaxamento de tensão, fluência e alterações de superfície em condições que simulem adequadamente o uso intraoral (Cenzato et al., 2024; Bhate et al., 2024; Puchert et al., 2025).

Outra lacuna relevante é a integração entre resultados laboratoriais e desfechos clínicos. Muitos estudos descrevem propriedades mecânicas e físico-químicas de forma isolada, mas ainda é necessário avançar em pesquisas que relacionem essas propriedades à previsibilidade de movimentos, necessidade de refinamentos, tempo total de tratamento e experiência do paciente. Essa aproximação entre ciência dos materiais e resultados clínicos é essencial para que a seleção de

materiais e recomendações de uso sejam baseadas em evidências aplicáveis à prática (Delgado et al., 2025; Nugent et al., 2025).

No que se refere à segurança biológica, a literatura recente indica relevância do tema, mas também ressalta a necessidade de maior uniformidade nos ensaios de liberação de compostos e de biocompatibilidade, com descrição detalhada de condições experimentais e maior aproximação das condições reais de uso. A análise de bisfenóis ilustra essa necessidade, uma vez que diferenças metodológicas podem resultar em achados não comparáveis, dificultando conclusões robustas (Peter et al., 2023; Özkan et al., 2023; Wendl et al., 2025).

Por fim, tendências como materiais multicamadas, blends e impressão 3D direta de alinhadores representam caminhos promissores, mas ainda demandam evidência consistente sobre estabilidade mecânica, alterações de superfície, desempenho estético e comportamento em longo prazo. Assim, a literatura sugere que futuras investigações devem combinar caracterização de materiais, envelhecimento simulado e avaliação clínica para produzir evidências mais completas e orientar decisões clínicas e desenvolvimento de novos polímeros (Chen et al., 2025; Eslami et al., 2024; Oyonarte et al., 2026).

5 CONCLUSÃO

O desempenho dos alinhadores ortodônticos é fortemente influenciado pelos polímeros utilizados em sua fabricação e pelas alterações induzidas pelo processamento e pelo envelhecimento em ambiente bucal simulado. De modo geral, o comportamento viscoelástico dos materiais, expresso por relaxamento de tensão e fluência, contribui para a redução temporal da força entregue e pode impactar a previsibilidade clínica de cada etapa do tratamento.

Do ponto de vista clínico, a seleção do material e a interpretação do desempenho do alinhador deve considerar não apenas a força inicial, mas também sua manutenção ao longo do tempo, a estabilidade dimensional e o comportamento de superfície, uma vez que alterações ópticas e aumento de rugosidade podem interferir em estética, higiene e adesão do paciente. Assim, não se identifica superioridade universal de um único polímero, e a decisão clínica deve ser contextualizada ao sistema utilizado, ao processamento e às condições de uso.

Para pesquisas futuras, recomenda-se padronização de protocolos experimentais (espessura efetiva, termoformagem, meio de envelhecimento, tempo e temperatura) e maior integração entre caracterização de materiais e desfechos clínicos, de modo a aproximar resultados laboratoriais da prática e orientar o desenvolvimento de polímeros com melhor manutenção de força e estabilidade em condições de uso.

REFERÊNCIAS

- ALBERTINI, P.; et al. Stress relaxation properties of five orthodontic aligner materials: a 14-day in vitro study. **Bioengineering**, v. 9, n. 8, e349, 2022.
- ALEXA, V. T.; et al. In vitro evaluation of biofilm formation by oral microorganisms on clear aligner materials: influence of mouthwash exposure. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 16, n. 11, e424, 2025.
- ARABPOUR, F.; et al. Evaluation of aging effects on the physical, chemical, and mechanical properties of thermoplastic materials for orthodontic clear aligners: an in vivo study. **BMC Oral Health**, v. 25, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12903-025-06966-4>.
- ASEFI, S.; et al. Investigation of the mechanical properties of thermoplastic materials influenced by different chemicals. **Turkish Journal of Orthodontics**, v. 37, n. 2, p. 91-97, 2024.
- BHATE, M.; NAGESH, S. Assessment of the effect of thermoforming process and simulated aging on the mechanical properties of clear aligner material. **Cureus**, v. 16, n. 7, e64933, 2024.
- BICHU, Y. M.; et al. Advances in orthodontic clear aligner materials. **Bioactive Materials**, v. 13, 2022.
- BOZKURT, A. P.; et al. Comparison of microbial adhesion and biofilm formation on different orthodontic aligners. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 167, n. 1, p. 47-62, 2025.
- CENZATO, N.; et al. Materials for clear aligners: a comprehensive exploration of characteristics and innovations: a scoping review. **Applied Sciences**, v. 14, n. 15, e6533, 2024.
- CHEN, D. D. S.; et al. Advances in clear aligner therapy: comparative evaluation of the optical properties and bacterial adhesion of 3D direct-printed and thermoformed aligners. **Progress in Orthodontics**, v. 26, e53, 2025.
- CHEN, S. M.; et al. An in vitro evaluation of aligner force decay in artificial saliva. **Journal of Dental Sciences**, v. 18, n. 3, p. 1347-1353, 2023.
- D'ANTÒ, V. et al. Predictability of tooth rotations in patients treated with clear aligners. **Scientific Reports**, v. 14, 11348, 2024.
- DELGADO, J. I.; KEHYAIAAN, P.; FERNÁNDEZ-BLÁZQUEZ, J. P. Thermoplastics for clear aligners: a review. **Polymers**, v. 17, n. 12, e1681, 2025.
- DROHOMYRETSKA, M. S. et al. Prediction accuracy of tooth movement in digital treatment planning with aligners: a systematic review. **Wiadomości Lekarskie**, v. 78, n. 12, p. 2763-2769, 2025.

ELSHAZLY, T. M.; et al. Effect of material composition and thickness of orthodontic aligners on the transmission and distribution of forces: an in vitro study. **Clinical Oral Investigations**, v. 28, 2024.

ESLAMI, S.; et al. Alterations in the surface roughness and porosity parameters of directly printed and Invisalign aligners after 1 week of intraoral usage: an in vivo prospective investigation. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 165, n. 1, p. 73-79, 2024.

FERREIRA, M.; et al. Do clear aligners release toxic chemicals? A systematic review. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 16, n. 5, e173, 2025.

FERRY, J. D. **Viscoelastic properties of polymers**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.

FINDLEY, W. N.; LAI, J. S.; ONARAN, K. **Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials**. New York: Dover Publications, 1976.

GRÜNHEID, T.; et al. Predicting the accuracy of tooth movements with Invisalign. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 152, n. 5, p. 650-659, 2017.

HAHN, W.; et al. Forces generated by three types of thermoplastic appliances on an upper central incisor during tipping. **Journal of Orofacial Orthopedics**, v. 71, n. 4, p. 245-253, 2010.

HAOULI, N.; et al. The predictability of orthodontic tooth movements using clear aligners: a systematic review. **Journal of Orthodontics**, v. 47, n. 4, p. 317-324, 2020.

HE, K.; et al. Evaluation of color stability and material surface stability of different types of clear aligners under curcumin staining in vitro. **BMC Oral Health**, v. 25, 2025.

KATRAS, S.; et al. Bisphenol A release from orthodontic clear aligners: an in vitro study. **Recent Progress in Materials**, v. 3, n. 3, e034, 2021

KOLENC, L. et al. Biocompatibility and safety of orthodontic clear aligners and thermoplastic retainers: a systematic in vitro review (2015–2025). **Applied Sciences**, v. 15, n. 23, 12494, 2025.

KRAVITZ, N. D.; et al. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 135, n. 1, p. 27-35, 2009.

LIU, M.; et al. Comparative mechanical performance of thermoplastic materials for clear aligners under simulated oral conditions. **Korean Journal of Orthodontics**, v. 55, n. 5, p. 380-391, 2025.

LO, I. L.; et al. The cytotoxicity assessment of different clear aligner materials on human periodontal ligament cells in vitro. **Journal of Dental Sciences**, v. 19, 2024.

MACRÌ, M.; et al. Clinical performances and biological features of clear aligners materials in orthodontics. **Frontiers in Materials**, v. 9, 819121, 2022.

MEI, L.; et al. Biomechanical aging behaviour of clear aligners. **Australasian Orthodontic Journal**, v. 40, n. 1, p. 60-66, 2024.

MONTERDE, A. B.; et al. Biofilm composition changes during orthodontic clear aligners compared to multibracket appliances: a systematic review. **Microorganisms**, v. 13, n. 5, e1039, 2025.

NUGENT, G.; et al. In vitro flexural testing of clear aligner materials: a scoping review of methods, results, and clinical relevance. **Applied Sciences**, v. 15, n. 13, e7516, 2025.

OYONARTE, R.; et al. Mechanical properties of thermoformed and direct-printed aligner materials after immersion in 37 °C water: a 14-day in vitro study. **Scientific Reports**, v. 16, 2026.

ÖZKAN, E. Ç.; DUMANLI GÖK, G. Evaluation of bisphenol release of different clear aligner materials using the liquid chromatography-mass spectrometry/mass spectrometry method. **The Angle Orthodontist**, v. 93, n. 6, p. 721-726, 2023.

PETER, E.; et al. Bisphenol-A release from thermoplastic clear aligner materials: a systematic review. **Journal of Orthodontics**, v. 50, n. 3, p. 276-286, 2023.

PUCHERT, K.; et al. Influence of water storage on the mechanical properties of 3D-printed aligners: an in vitro study. **Bioengineering**, v. 13, n. 1, e21, 2026.

RYU, J. H.; et al. The effect of thermoforming on the physical and mechanical properties of dental thermoplastic materials: a systematic review and meta-analysis. **Journal of Prosthodontic Research**, v. 62, n. 2, p. 138-146, 2018.

SHIMIZU, R. H.; et al. Evaluation of color stability of orthodontic aligners: in vitro study. **Revista de Odontologia da UNESP**, v. 54, e20250010, 2025.

SIMON, M.; et al. Forces and moments generated by aligner treatment: a laboratory study. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 145, n. 5, p. 616-623, 2014.

SMILLER ALINHADORES. **Conheça os materiais por trás dos alinhadores Smiller**. s. d.

STADERINI, E.; et al. Chemical, optical, and morphological properties of TPU and PET-G samples after aging in artificial saliva: an in vitro study. **BMC Oral Health**, v. 25, 2025.

WENDL, T. et al. Analysis of orthodontic aligner biocompatibility: leachable compounds of different aligner materials. **Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik**, v. 71, n. 1, p. 31-38, 2026.

WENDL, T.; et al. Analysis of orthodontic aligner biocompatibility: leachable compounds of different aligner materials. **Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik**, v. 71, n. 1, p. 31-38, 2026.

XIANG, B.; et al. The force effects of two types of polyethylene terephthalate glycol-modified clear aligners immersed in artificial saliva. **Scientific Reports**, v. 11, 10052, 2021.

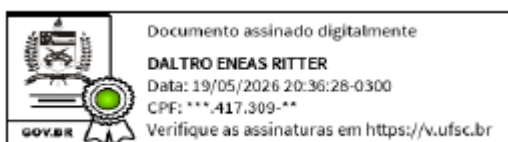
ANEXO A – Ata de Defesa

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
CURSO DE ODONTOLOGIA
DISCIPLINA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ODONTOLOGIA

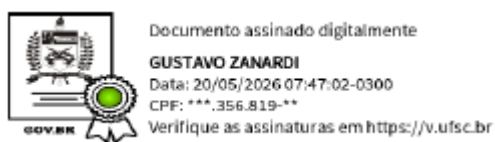
ATA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 8 dias do mês de Maio de 2026, às 18:00h horas, em sessão pública online no link <https://meet.google.com/nqv-qcrg-wvn>, na presença da Banca Examinadora presidida pelo Professor Daltro Enéas Ritter e pelos examinadores:

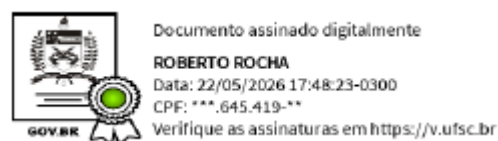
1 - Roberto Rocha, 2 -Gustavo Zanardi, o aluno Arthur Luis Xavier Hering apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação intitulado: **Análise de polímeros utilizados na fabricação de alinhadores odontológicos: Revisão de Literatura** como requisito curricular indispensável à aprovação na Disciplina de Defesa do TCC e a integralização do Curso de Graduação em Odontologia. A Banca Examinadora, após reunião em sessão reservada, deliberou e decidiu pela aprovação do referido Trabalho de Conclusão do Curso, divulgando o resultado formalmente ao aluno e aos demais presentes, e eu, na qualidade de presidente da Banca, lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos demais componentes da Banca Examinadora e pelo aluno orientando.



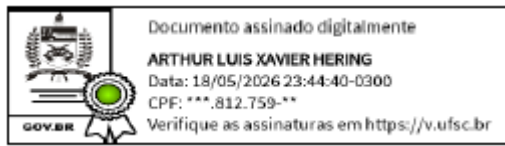
Presidente da Banca Examinadora



Examinador 1



Examinador 2



Aluno

APÊNDICE A – Glossário

Absorção de água: incorporação de moléculas de água pela matriz polimérica, podendo alterar propriedades mecânicas e físico-químicas ao longo do tempo.

Acurácia (ou previsibilidade do movimento): proporção do movimento planejado que é efetivamente alcançada clinicamente, geralmente expressa em porcentagem.

Ativação: deslocamento programado por etapa (em mm) entre a posição atual do dente e a posição prevista no alinhador, relacionado à força gerada na inserção.

Biofilme: comunidade de microrganismos aderida a uma superfície e envolta por matriz extracelular, com potencial impacto na higiene e no odor de dispositivos intraorais.

Bisfenol A (BPA): composto químico do grupo dos bisfenóis, investigado quanto à possibilidade de liberação por materiais plásticos em determinadas condições.

Bisfenóis: grupo de compostos orgânicos presentes em alguns plásticos e resinas; em Odontologia, investiga-se a possível liberação sob diferentes protocolos de extração e envelhecimento.

Blends (misturas poliméricas): misturas físicas de dois ou mais polímeros, empregadas para ajustar propriedades do material sem necessariamente formar um novo copolímero.

Copolímero: polímero formado por mais de um tipo de monômero, podendo apresentar propriedades distintas de homopolímeros.

Cristalinidade: grau de organização das cadeias poliméricas em regiões ordenadas; pode influenciar rigidez, estabilidade dimensional e transparência.

Citotoxicidade: potencial de um material ou de seus extratos causar redução de viabilidade celular ou dano celular em ensaios laboratoriais.

Deformação: alteração de forma/dimensões de um material em resposta a uma carga aplicada.

Delaminação: separação entre camadas em um material multicamadas, potencialmente favorecida por umidade, envelhecimento e tensões repetidas.

Desregulador endócrino: substância capaz de interferir em vias hormonais em determinadas condições e doses.

Elasticidade: capacidade de deformação reversível de um material, retornando à forma original após remoção da carga no regime elástico.

Envelhecimento (do material): alterações graduais de propriedades decorrentes de tempo de uso e exposição a umidade, temperatura, variações de pH, pigmentos e agentes químicos.

Estabilidade de cor: capacidade do material manter a cor ao longo do tempo, sem alterações perceptíveis após exposição a pigmentos e condições de uso.

Estabilidade dimensional: capacidade de manter forma e dimensões ao longo do tempo, preservando adaptação e retenção do dispositivo.

Extrato (do material): solução obtida após incubação do material em um meio, utilizada para avaliar substâncias liberadas e efeitos biológicos em ensaios in vitro.

Fluência: aumento progressivo da deformação ao longo do tempo sob tensão constante.

Força (ortodôntica, em alinhadores): carga gerada pela deformação do alinhador ao ser inserido, responsável por induzir movimentação dentária.

Imersão: exposição do material a um meio líquido por tempo definido, utilizada para simular condições de uso e envelhecimento.

Leachables (compostos lixiviáveis): substâncias que podem migrar do material para o meio ao longo do tempo, especialmente sob condições de extração e envelhecimento.

Módulo de elasticidade (módulo de Young): parâmetro que expressa rigidez no regime elástico, relacionando tensão e deformação.

MTT: ensaio colorimétrico in vitro utilizado para estimar viabilidade celular a partir da atividade metabólica.

PET (poli(tereftalato de etileno)): poliéster termoplástico amplamente utilizado na indústria, base estrutural de materiais relacionados empregados em lâminas para termoformagem.

PETG (poli(tereftalato de etileno) glicol-modificado): copoliéster obtido pela modificação do PET com unidades de glicol, reduzindo cristalinidade e aumentando processabilidade; frequente em alinhadores termoformados.

Plastificação (efeito plastificante): redução de rigidez e aumento de mobilidade das cadeias do polímero, frequentemente associada à absorção de água.

Poliuretano (PU): família de polímeros com ampla variabilidade estrutural; em alinhadores, pode compor diferentes formulações com propriedades específicas.

Poliuretano termoplástico (TPU): poliuretano processável como termoplástico, com estrutura segmentada que pode combinar resistência e flexibilidade.

Porosidade superficial: presença de microcavidades/irregularidades que podem favorecer retenção de pigmentos e biofilme.

Recuperação elástica: capacidade do material retornar à forma original após deformação, influenciando a manutenção de adaptação e a expressão de força.

Relaxamento de tensão: redução da tensão ao longo do tempo sob deformação constante, associada à queda de força entregue pelo alinhador durante o uso.

Resistência mecânica: capacidade de suportar tensões sem fratura ou deformação permanente, relevante para durabilidade do alinhador.

Rugosidade superficial: irregularidades microscópicas na superfície do material, associadas à estética, ao manchamento e à adesão microbiana.

Saliva artificial: solução utilizada em estudos laboratoriais para simular, de forma padronizada, condições químicas do meio bucal.

Termoformagem: processo de aquecimento e conformação de uma lâmina termoplástica sobre um modelo, originando o alinhador.

Termoplástico: polímero que amolece com aquecimento e pode ser moldado, permitindo fabricação por termoformagem.

Tensão: medida da força interna por unidade de área em um material submetido a carga.

Transparência: propriedade óptica relacionada à passagem de luz pelo material, relevante para estética do alinhador.

Viscoelasticidade: comportamento mecânico que combina resposta elástica e viscosa, implicando dependência temporal da força e da deformação.