

**UNIVERSIDADE DO GRANDE RIO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA**

**ALTERAÇÃO DIMENSIONAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ALINHADORES ORTODÔNTICOS INVISALIGN**

ERIKA BÖHRER CASSIO

2023

UNIVERSIDADE DO GRANDE RIO EM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA

ALTERAÇÃO DIMENSIONAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALINHADORES
ORTODÔNTICOS INVISALIGN

ERIKA BÖHRER CASSIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia, da Universidade do Grande Rio (UNIGRANRIO), como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Odontologia (Área de Concentração: Clínica Odontológica)

Orientador:
Prof. Dr. Victor Talarico Leal Vieira

Co-orientador:
Prof. Dr. José Claudio Provenzano

2023

ALTERAÇÃO DIMENSIONAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALINHADORES
ORTODÔNTICOS INVISALIGN

ERIKA BÖHRER CASSIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia, da Universidade do Grande Rio (UNIGRANRIO), como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Odontologia (Área de Concentração: Clínica Odontológica).

Aprovada em 22 de Novembro de 2023

Banca examinadora



Prof. Dr. Victor Talarico Leal Vieira
Universidade do Grande Rio



Prof. Dr. Fabiano Luiz Heggendorf
Universidade do Grande Rio



Prof. Dr. Marcos Cezar Ferreira
Instituto de Odontologia Multidisciplinar

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu filho Matheus que apesar dos períodos de ausência pode compreender o meu propósito, estando sempre ao meu lado, me apoiando e incentivando para que pudesse realizar essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela luz na condução dos meus caminhos e pela sua força em me deixar segura na certeza de que nunca estive sozinha.

Agradeço a minha família pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Muito obrigada aos amigos em especial Thamyres, Warley, Giuliana, Bianca, Fatima, Karen, Amanda que tive a sorte de encontrar e construir amizades sólidas para o resto vida. E a todos os colegas os quais tive o privilégio de conviver durante o curso.

Gratidão aos professores de graduação em ortodontia da Unigranrio, Sergio e Luciana que me concederam o estágio docente e ao professor Sergio que participou da minha banca de qualificação. Foi um grande incentivador.

Muito obrigada a todos professores do programa de pós-graduação desta Instituição em especial ao professor Victor Talarico pela parceria e por tanto conhecimento compartilhado. E também um agradecimento ao professor Fabiano que me aceitou em um projeto de traumatismo dentário que foi de grande aprendizado e crescimento dentro do programa.

Agradeço ao professor Marcos Cezar Ferreira, que desde 2009 sempre foi meu maior incentivador na minha carreira docente e felizmente pode compor a banca da defesa da dissertação.

E por último, e não menos importante, gostaria de fazer agradecimento especial ao coordenador do programa, professor Flavio que acreditou em mim e no meu projeto, me concedendo a oportunidade de poder subir mais esse degrau na minha carreira profissional.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA	11
2. JUSTIFICATIVA	19
3. OBJETIVO(S)	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
5. RESULTADOS	27
6. DISCUSSÃO	29
7. CONCLUSÕES	34
8. REFERÊNCIAS BOBLOGRÁFICAS	35

RESUMO

Objetivo(s). Avaliar o efeito da temperatura e umidade nos alinhadores Invisalign na estabilidade dimensional e na flexibilidade. **Materiais e Métodos.** Para o ensaio de microtomografia foram selecionados 10 alinhadores da marca Invisalign (San José, California, EUA) segmentados de distal a distal de incisivos laterais inferiores. Eles foram utilizados para avaliação de estabilidade dimensional (n=10). Foram formados 2 grupos radômicos (n=5) - G1 (5°C, 37°C), G2 (5°C, 37°C e 55°C). Os grupos G1D e G2D foram gerados após a termociclagem. O mesmo se deu para o ensaio de flexão onde foram utilizados outros 12 alinhadores inteiros (sem segmentação). **Resultados.** Os resultados obtidos na análise de micro-CT antes e após a termociclagem não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre os grupos para a condição de resfriamento ($p>0,05$). O volume médio dos alinhadores aumentou em 5,76% para a condição de resfriamento e aquecimento ($p<0,05$). A espessura média dos alinhadores também aumentou em 6,51% para a condição de resfriamento e aquecimento ($p<0,05$). E no ensaio de flexão mostrou que a força de flexão dos alinhadores não apresentou diferença estatisticamente significativa entre os grupos tanto para resfriamento, quanto para condição de aquecimento e resfriamento ($p>0,05$). O mesmo se deu para os ensaios de área. **Conclusão(es).** O resfriamento não gerou alterações dimensionais e nem na flexibilidade dos alinhadores. Já quando foram submetidos ao aquecimento e resfriamento, ocorreu alteração volumétrica e linear (espessura), com aumento de aproximadamente de 6%.

Palavras-chave: Alinhadores; Microtomografia; Ortodontia.

ABSTRACT

Aim(s). Evaluate the effect of the temperature and humidity on Invisalign aligners on dimensional stability and flexibility. **Materials and Methods.** For the microtomography test, 10 aligners from Invisalign brand (San José, California, USA) were selected, segmented from distal to distal of the lower lateral incisors. They were used to evaluate dimensional stability (n=10). Two randomic groups (n=5) were formed – G1 (5^o C, 37^o C), G2 (5^o C, 37^o C and 55^o C. The groups G1D and G2D were generated after thermocycling. The same occurred for the flexion test, were another 12 entire aligners were used (without segmentation). **Results.** The results obtained in the micro-CT analysis before and after thermocycling did not show a statistically significant difference between the groups for the cooling condition (p>0,05). The average volume of the aligners increased by 5,76% for the cooling and heating conditions (p>0,05). The average thickness of the aligners also increased by 6,51% for the cooling and heating conditions (p<0,05). And the flexion test showed that the flexion strength of the aligners did not present a statistically significant difference between the groups for both cooling and heating and cooling conditions (p>0,05). The same happened for area tests. **Conclusion(s).** Cooling did not generate dimensional changes or changes in the flexibility of the aligners. When they were subject to heating and cooling, there was a volumetric and linear change (thickness), with an increase of approximately 6%.

Keywords: Aligners; Microtomography; Orthodontics.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Posicionamento do alinhador em um troquel de cera para realização do escaneamento 17
- Figura 2. Termociclador ODEME OMC 350TS utilizado para tratamento térmico dos CPs utilizados (A). Detalhe dos CPs posicionados no interior da cesta do equipamento (B) 18
- Figura 3. Visualização do painel do equipamento com os ajustes nos quais foram realizados os ensaios. 19
- Figura 4. Microtomógrafo Bruker utilizado no ensaio de microtomografia computadorizada. Visualização do painel do equipamento com os ajustes nos quais foram realizados os ensaios 19
- Figura 5. Máquina EMIC DL 200 MF utilizada para flexão em 3 pontos 21
- Figura 6. Posicionamento do alinhador para realização do ensaio de flexão (A). Atuador exercendo força no alinhador posicionado na base de flexão em 3 pontos (B) 22
- Figura 7. Modelo tridimensional obtido através da análise de μ CT. A imagem mostra o escaneamento inicial (em verde) e a sobreposição do depois (em vermelho) com as respectivas variações volumétricas no resfriamento (B). 24
- Figura 8. Modelo tridimensional obtido através da análise de μ CT. A imagem mostra o escaneamento inicial (em verde) e a sobreposição do depois (em vermelho) com as respectivas variações volumétricas no aquecimento (A) e no resfriamento (B). 24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Resultados da avaliação por microtomografia computadorizada e no ensaio de flexão dos grupos de alinhadores estudados	23
-----------	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

AOIs	Alinhadores Ortodônticos Invisíveis
CAD/CAM	Design Assistido por Computador/Fabricação Assistida por Computador
μCT	Microtomografia Computadorizada
PE	Polietileno
PET	Polietileno tereftalato
PETG	Polietileno tereftalato glicol
PU	Poliuretano
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila
TAT	Tratamento com Alinhadores Transparentes

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA

Nas últimas décadas, despertou-se o interesse pela estética na odontologia e isso se estende a correção do posicionamento dentário. PROFFIT *et al.* (2013) propuseram que o aparelho ortodôntico ideal não deveria interferir na oclusão ou higiene e não deveria danificar os tecidos bucais. Deveria ser leve, mas capaz de suportar forças mastigatórias. Ser firmemente retido, aplicar uma força controlada entre as visitas e permitir um bom controle da ancoragem.

Os aparelhos ortodônticos convencionais possuem a estética comprometida. Ocasionalmente aumentam o risco de lesões cariosas, causam gengivite e periodontite devido ao acúmulo de placa ao redor das peças. Isso resulta em saúde bucal prejudicada (DANIELE *et al.*, 2020).

Para remediar esse problema, os alinhadores ortodônticos invisíveis (AOIs) foram introduzidos como alternativas para braquetes e fios. A substituição de braquetes metálicos por AOIs é um dos principais motivos da popularidade dos tratamentos com alinhadores. Além de oferecer resultados semelhantes, os alinhadores, tendem a causar menos danos aos dentes e periodonto tanto durante a adaptação quanto no seu uso diário (JIANG *et al.*, 2018; RYU *et al.*, 2018; DANIELE *et al.*, 2020). Assim, os requisitos estéticos alcançados com os alinhadores transparentes nos tratamentos ortodônticos são muito procurados (DUPAIX & BOYCE, 2005; KOHDA *et al.*, 2013; MARTORELLI *et al.*, 2013; RYU *et al.*, 2018).

Com o aumento da demanda por ortodontia para adultos, a procura por aparelhos ortodônticos invisíveis aumentou significativamente (DANIELE *et al.*, 2020). Os AIOs são facilmente inseridos e removidos por não serem colados, não ocorre interferência na mastigação do paciente, não prejudicando sua higiene bucal (OGAARD *et al.*, 1988; LOMBARDO *et al.*, 2015; IHSEN *et al.*, 2019; PRATTO *et al.*,

2021). Portanto, eles vêm sendo amplamente utilizados em tratamentos ortodônticos de adultos e crianças (PRATTO *et al.*, 2021). Por serem mais confortáveis e mais estéticos, os AIOs se tornaram os mais procurados dentre os tratamentos ortodônticos e se estabeleceram, definitivamente, como uma opção viável de tratamento (DALAIE *et al.*, 2021).

A utilização de aparelhos ortodônticos de sobreposição transparente foi descrita em 1945 (KESLING *et al.*, 1945) e introduzida em 1946, quando concebeu o conceito de usar uma série de posicionadores de dentes termoplásticos para mover progressivamente dentes desalinhados para posições melhores (GALE & DARVEL, 1999; FANG *et al.*, 2013). Dentro do centro de tecnologia de Alinhamento (Santa Clara, Califórnia) adaptou-se e incorporaram-se tecnologias modernas para introduzir o tratamento com alinhador transparente (TAT) como o conhecemos, tornando o conceito de KESLING (1945) uma opção viável de tratamento ortodôntico.

Em 1998, a Align Technology, Inc (Santa Clara, Califórnia, EUA) introduziu o sistema Invisalign, o que levou adiante os princípios de KESLING. É um sistema que consiste em uma série de alinhadores removíveis de poliuretano, como uma alternativa estética aos aparelhos labiais fixos (BRADLEY *et al.*, 2015). O sistema Invisalign usa a tecnologia estereolitográfica CAD/CAM para prever o tratamento e fabricar muitos alinhadores personalizados a partir de uma única impressão. Cada alinhador é programado para mover 0,25 mm por dente a cada 7 a 14 dias. (KUO *et al.*, 2003; BRADLEY *et al.*, 2015).

1.1 MATERIAIS UTILIZADOS PARA CONFECÇÃO DOS AIOs

Os materiais dos alinhadores transparentes são compostos de polímeros termoplásticos, transparentes e removíveis. Os comumente usados são polietileno

(PE), polietileno tereftalato (PET), polietileno tereftalato glicol (PETG), poliuretano (PU), polipropileno (PP) e policloreto de vinila (PVC) (IHSEN *et al.*, 2019).

A maioria dos fabricantes atuais de alinhadores usa polietileno tereftalato glicol modificado (PETG). Considerando a crescente atenção no campo da odontologia para o uso de alinhadores ortodônticos invisíveis, mais pesquisas sobre os materiais termoplásticos usados para fabricar os alinhadores são necessárias (DANIELE *et al.*, 2020). A introdução de novos materiais para fabricação de alinhadores chama a atenção de alguns pesquisadores (ELSHAZLY *et al.*, 2021). Até o momento, existem mais de 27 marcas diferentes de alinhadores transparentes disponíveis no mercado global (FANG *et al.*, 2020)

1.2 EVOLUÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO NO INVISALING:

Em 2001, Invisalign® (Align Technology, San Jose, CA, EUA), como a marca mais amplamente utilizada, foi usada para tratar mais de 5 milhões de pacientes em todo o mundo. E lançou várias gerações de materiais alinhadores patenteados, desde o primeiro Proceed 30 (PC30), uma mistura de polímeros que não atendia a todos os requisitos físico-químicos e clínicos para movimentação dentária ortodôntica. Por causa da proteção de patente, as folhas de matéria-prima que são usadas para fazer alinhadores termoformados, especialmente LD30, nem sempre estão disponíveis para a análise de propriedades mecânicas (FANG *et al.*, 2020).

Em 2013, esse material foi substituído pelo Exceed30 (EX30), composto por poliuretano metileno difenil diisocianato 1,6-hexanodiol. EX30 apresentou melhores propriedades em relação ao PC30; de fato, apresentou uma elasticidade 1,5 vezes maior que a do PC30, facilitando a remoção e inserção dos alinhadores. Além disso, os alinhadores foram quatro vezes mais adaptáveis do que os produzidos com PC30.

Em seguida, um novo polímero inovador chamado SmartTrack® (LD30) foi introduzido. É um polímero de poliuretano/copolíéster termoplástico aromático multicamadas protegidas por patente. O LD30 apresenta três vantagens principais em relação ao EX30: maior consistência na aplicação das forças ortodônticas, maior elasticidade, estabilidade química e um ajuste ainda mais preciso e confortável do alinhador (FANG *et al.*, 2020).

1.3 TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO:

Os alinhadores ortodônticos são produzidos a partir de moldes prototipados (modelos de referência), por um processo de termoformagem à vácuo. Uma folha polimérica é moldada sobre cada modelo impresso em 3D e recortada a laser para obter a configuração final (BARONE *et al.*, 2016). Os alinhadores customizados são criados individualmente para mover os dentes para a posição desejada de forma eficaz e personalizada (ELSHAZSLY *et al.*, 2021).

A ortodontia digital já é uma realidade e só foi possível devido aos grandes avanços tecnológicos na área de desenvolvimento de projeto/design combinados com técnicas de fabricação/manufatura assistidas por computador (CAD/CAM) que permitem que uma série de aparelhos plásticos sejam capazes de movimentar dentes do início ao final do tratamento (DANIELE *et al.*, 2020).

Posteriormente, a ortodontia plástica, especialmente projetada para pacientes adultos, foi desenvolvida (GALAN-LOPEZ *et al.*, 2019).

Recentemente, tem sido utilizada em dispositivos que proporcionam movimentos dentários mais complexos, oferecendo mais conforto ao usuário, aumentando a popularidade desse tipo de aparelhos na odontologia contemporânea (ELKHOLY *et al.*; 2016).

1.4 MECÂNICA ORTODÔNTICA COM ALINHADORES:

Os alinhadores funcionam utilizando o movimento fisiológico dos dentes que são planejados por um software Clincheck Pro 6.0 alocado exercendo forças mecânicas constantes (LOMBARDO *et al.*, 2020; DALAIE *et al.*, 2021). A utilização de diferentes técnicas na produção de alinhadores, bem como sua composição química, são fatores relevantes a serem considerados. Os encontrados atualmente no mercado baseiam-se em diferentes tecnologias de fabricação, software de configuração, material, transparência, qualidade, técnica de acabamento, protocolo clínico e espessura do disco, geralmente entre 0,50 e 1,50 mm (LOMBARDO *et al.*, 2015, LOMBARDO *et al.*, 2020).

A força ortodôntica produzida por um material termoplástico está fortemente correlacionada com suas propriedades mecânicas iniciais e principalmente com sua rigidez. As características biomecânicas e de entrega de força dos alinhadores dependem da geometria do aparelho, sua configuração, estagiamento e fortemente das características físicas do material de que é feito (IHSEN *et al.*, 2019). Portanto, quaisquer mudanças significativas entre os diferentes sistemas ou ao longo do tempo na boca podem ter um impacto sobre o sistema de alinhadores que o profissional escolher usar (BRADLEY *et al.*, 2015; BUCCI *et al.*, 2019).

Depois de começar a usar um alinhador estético, os dentes são submetidos a uma força ortodôntica que diminui significativamente ao longo do tempo devido à fadiga do material. Cada alinhador pode mover os dentes de forma limitada em cerca de 0,2 a 0,3 mm para translações e 1 grau a 3 graus para rotações (IHSEN *et al.*, 2019)

Alguns autores comprovaram que os tratamentos com alinhadores registram um número alto de recidivas onde as sobrecorreções vêm se tornando uma constante nos planejamentos principalmente nos movimentos de rotações e extrusões (LOMBARDO *et al.*, 2020).

1.5 DETERIORAÇÃO DIMENSIONAL DO MATERIAL

Para a confecção do alinhador dentário, os discos comerciais devem ser aquecidos e moldados a vácuo sobre um modelo impresso da arcada dentária do paciente em um equipamento de moldagem a vácuo (FANG *et al.*, 2020; BRADLEY *et al.*, 2015). Portanto, identificar as propriedades físico-químicas e mecânicas do material a ser utilizado é essencial, pois conhecendo a composição do material as condições adequadas de temperatura para o processamento ele pode ser aplicado, evitando falhas, como formação de bolhas, durante o processo de moldagem a vácuo do sistema polimérico e evitando a perda de material por degradação térmica (ZHANG *et al.*, 2011; DANIELE *et al.*, 2020; PRATTO *et al.*, 2021).

Polímeros de resina não são inertes, e são propensos a mudar diante do calor, umidade, forças constantes e saliva no ambiente oral (FANG *et al.*, 2020). Suas características biomecânicas são influenciadas pela natureza química do polímero e pelas condições de processamento do material (PRATTO *et al.*, 2021). Portanto, parece lógico que qualquer enfraquecimento dos materiais dos alinhadores, seja decorrente do processo de fabricação (GALE *et al.*, 1999) ou após exposição ao meio bucal (FANG *et al.*, 2020), reduziria sua eficiência e, posteriormente, movimentos dentários menos previsíveis ocorreriam. Mas, como esse processo ocorre e como ele pode ser limitado tem sido menos pesquisado precisamente em estudos posteriores.

Anteriormente, estudos confirmaram a forte relação entre as propriedades mecânicas dos materiais dos alinhadores, como dureza e módulo de elasticidade, e a quantidade de força exercida pelos alinhadores (DALAIE *et al.*, 2021). Portanto, qualquer fator que leve a mudanças consideráveis nas propriedades mecânicas dos alinhadores causará alterações no sistema de aplicação de força e na eficácia do tratamento. O efeito da termoformagem (BUCCI *et al.*, 2019; DALAIE *et al.*, 2021), termociclagem e do envelhecimento (WEIR T., 2017; IHSEN *et al.*, 2019) sobre as propriedades de diferentes materiais de alinhadores foram avaliados anteriormente. Existem controvérsias na literatura sobre esse assunto, não havendo consenso sobre a influência desses fatores (DALAIE *et al.*, 2021).

1.6 TEMPO DE USO DOS ALINHADORES E DURAÇÃO DOS TRATAMENTOS ORTODÔNTICOS REALIZADOS COM ALINHADORES

Por serem tratamentos programados por softwares, eles se tornam personalizados, previsíveis e conseqüentemente mais rápidos. Portanto o tempo de tratamento com alinhadores conseguem ser até 30% mais curtos que os tratamentos ortodônticos convencionais. Uma condição fundamental para que isso aconteça é que o paciente use os alinhadores de 20 a 22 horas diárias e troque os mesmos, entre 7 e 14 dias para um tratamento eficaz, mantendo a força ortodôntica adequada para a movimentação dentária (MEMÈ *et al.*, 2021). Os alinhadores ortodônticos transparentes mostraram um período de tratamento e tempo de cadeira reduzidos em casos leves a moderados. E eles demonstraram ser uma alternativa eficiente e viável aos aparelhos fixos (IHSEN *et al.*, 2019). Entretanto um tratamento ortodôntico com alinhadores necessita em média de 25 a 40 alinhadores para a sua conclusão e cerca de 70-80% dos tratamentos ortodônticos requerem correção no meio do curso, refinamento do caso com mais sequência de alinhadores, mecânica auxiliar ou até

mesmo, conversão para aparelhos fixos antes do final do tratamento (MEMÈ *et al.*, 2021).

2. JUSTIFICATIVA

A estocagem e utilização dos alinhadores AIOs podem alterar a dimensão e as propriedades mecânicas do polímero o qual é fabricado, afetando na sua performance clínica. A variação de temperatura e a umidade são variáveis que podem interferir neste processo. A alteração do *Smart track* Invisalign pode gerar deformações durante a utilização afetando o resultado do tratamento. Saber sobre estas modificações pode orientar o profissional e o paciente, como proceder para evitar transtornos no tratamento ou reduzir sua eficácia. É de conhecimento que a temperatura pode ter um efeito no aumento da rigidez do material, o qual por sua vez poderia influenciar no desfecho clínico final. Os materiais e as técnicas de produção dos alinhadores vêm sofrendo modificações nos últimos anos, e não existem estudos, até o momento, investigando o efeito da temperatura e da umidade no novo material. Além disto, não existem estudos reportando a variação dimensional através da metodologia de microtomografia computadorizada.

3. OBJETIVO

Avaliar o efeito da temperatura e umidade nos alinhadores Invisalign na estabilidade dimensional e na flexibilidade deles. Com a finalidade de simular condições de estocagem dos mesmos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Seleção da amostra e divisão dos grupos:

Para o ensaio de microtomografia foram selecionados inicialmente 12 alinhadores da marca Invisaling (San José, California, EUA) da arcada inferior de uma mesma paciente cortados e na região dos 4 incisivos inferiores de distal de incisivo lateral a distal do incisivo lateral do lado oposto (Figura 1). Nenhum dos alinhadores foi utilizado clinicamente por paciente, portanto não houve contato com o meio bucal. Dez alinhadores foram utilizados para avaliação de estabilidade dimensional (n=10). Foram formados 2 grupos radômicos (n=5) - G1 (5°C, 37°C), G2 (5°C, 37°C e 55°C). Os grupos G1D e G2D foram gerados após a termociclagem.

Para o ensaio de flexão foram utilizados outros 12 alinhadores integros (sem segmentação). Os alinhadores também foram divididos randomicamente com a mesma nomenclatura anterior (G1 para as temperaturas de 5°C, 37°C; e G2 para 5°C, 37°C e 55°C). Após a termociclagem os grupos G1D e G2D foram obtidos.

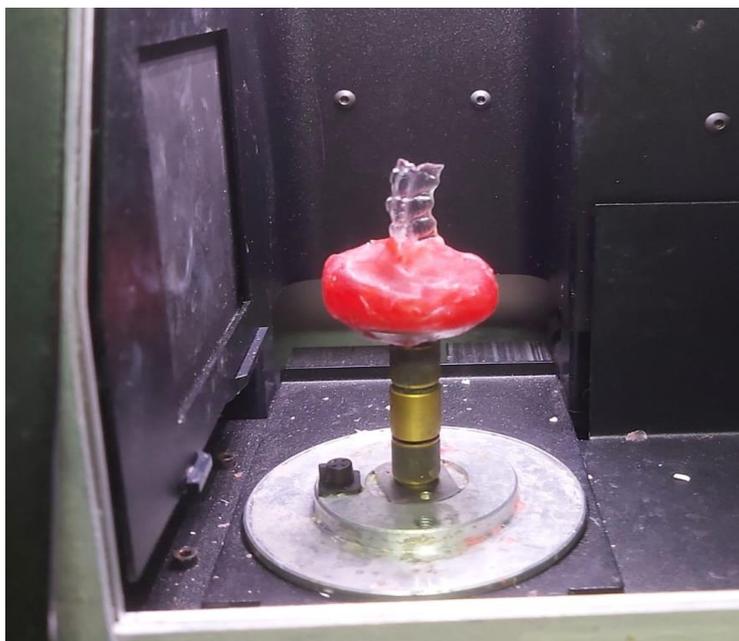


Figura 1 - Posicionamento do alinhador em um troquel de cera para realização do escaneamento.

4.2 Preparação dos grupos e termociclagem

Dez alinhadores foram submetidos ao escaneamento antes e após a termociclagem. Os alinhadores foram divididos em Grupo 1 (G1) – antes de serem submetidos as temperaturas de 5^o C, 37^oC; (n=5) e grupo 2 (G2) antes de serem submetidos as temperaturas de 5^oC, 37^oC e 55^oC (n=5). Cada ensaio totalizou 42 ciclos. Após os ciclos foram gerados os grupos G1D e G2D, oriundos dos grupos G1 e G2 respectivamente.

Para o ensaio de flexão doze alinhadores foram utilizados. A mesma nomenclatura foi utilizada, G1 somente com ciclos de resfriamento e G2 para ciclos de resfriamento e aquecimento. Os subgrupos G1D e G2D foram gerados após a termociclagem a partir dos grupos G1 e G2 respectivamente. (Figura 2 – A e B) (Figura 3).

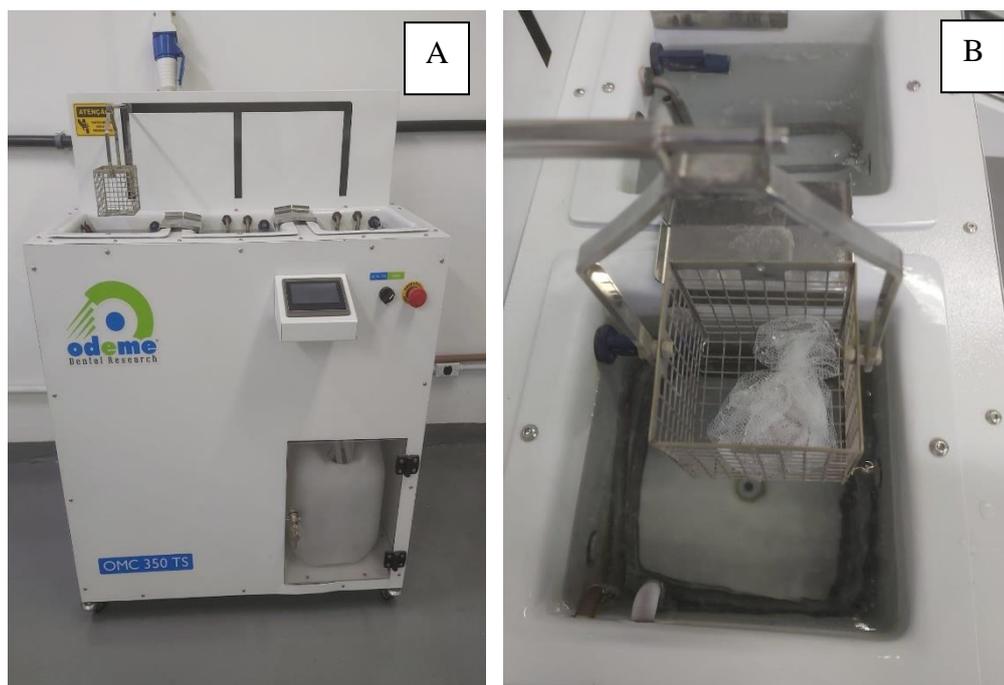


Figura 2 - Termociclador ODEME OMC 350TS utilizado para tratamento térmico dos CPs utilizados (A). Detalhe dos CPs posicionados no interior da cesta do equipamento (B).



Figura 3 - Visualização do painel do equipamento com os ajustes nos quais foram realizados os ensaios.

4.3 Análises de Micro CT

4.3.1 Parâmetros de escaneamento

Foi utilizado um microtomógrafo SkyScan 1174v2 (Bruker-microct, Kontich, Bélgica) (Figura 4), com os seguintes parâmetros: 29 Kv, 503 mA, resolução isotrópica de 25.34 μm . A digitalização foi realizada por rotação de 360° em torno do eixo vertical com um passo de rotação de 0.9 quadro média de 4, tempo de exposição da câmera de 1600 ms e sem filtro de alumínio. O tempo de duração de cada escaneamento foi de 13 minutos.



Figura 4 - Microtomógrafo Bruker utilizado na análise de variação dimensional dos alinhadores.

4.3.2 Parâmetros de reconstrução

Após os procedimentos de digitalização, os dados adquiridos através das imagens de projeção foram reconstruídos (NRecon v.1.6.9.18, Bruker micro-CT), fornecendo cortes axiais das amostras, com uma correção de artefato de anel de 10, uma correção de *beam hardening* de 50% e *smoothing* de 5 que resultou ao final da reconstrução em 748 fatias.

4.3.3 Análises das amostras

Depois das reconstruções dos alinhadores antes e depois da termociclagem, os modelos 3D inicial e final (depois da termociclagem) dos alinhadores foram convertidos do formato BMP para NRRD no *software Image J* (Fiji 1.49b; Java 1.6.0 24 [64bit]) e registrados no programa *Slicer* v1.5.1.2 (www.slicer.org, *Artificial Intelligence Laboratory of Massachusetts Institute of Technology and Surgical Planning Laboratory at Brigham and Women's Hospital and Harvard Medical School, Chapel Hill, NC, EUA*) com algoritmo de registro *Brains*, com os seguintes parâmetros: Initialize transform mode – Use geometry align e Registration Phases – Rigid+Scale+Skew (10 DOF), Affine (12 (DOF). Para análises quantitativas das amostras, antes e depois da termociclagem, foi utilizado o programa CTAn v.1.14.4 (Bruker Micro-CT, Kontich, Bélgica), após a binarização de cada amostra foi analisada a espessura média dos alinhadores, área através do comando *individual2D object analysis* e para o volume foi usado o comando *3D Analysis* através do *object volume*.

4.5 Ensaio de flexão

Para o ensaio de flexão foi utilizada uma máquina de ensaios universal EMIC DL 200 MF (São José dos Pinhais, Santa Catarina, Brasil) (Figura 5). Uma célula de carga de 20N foi acoplada a cabeça da máquina. O CP foi posicionado na base da máquina para realização do ensaio de flexão em 3 pontos (Figura 6). A força foi registrada pelo programa TESC onde foi gerado relatório para posterior análise estatística. A velocidade foi de 2mm/min. O deslocamento realizado foi de 5mm com uma taxa de deslocamento de 15mm/min. E a distância entre os pontos da base foi de 12mm.

Para este ensaio foram utilizados 12 alinhadores que foram submetidos aos testes antes e depois da termociclagem. Foram formados 2 grupos de maneira randômica cada um contendo seis alinhadores (n=6). Os parâmetros da termociclagem foram os mesmos dos grupos dos ensaios de microtomografia.



Figura 5 – Máquina EMIC DL 200 MF utilizada para flexão em 3 pontos.

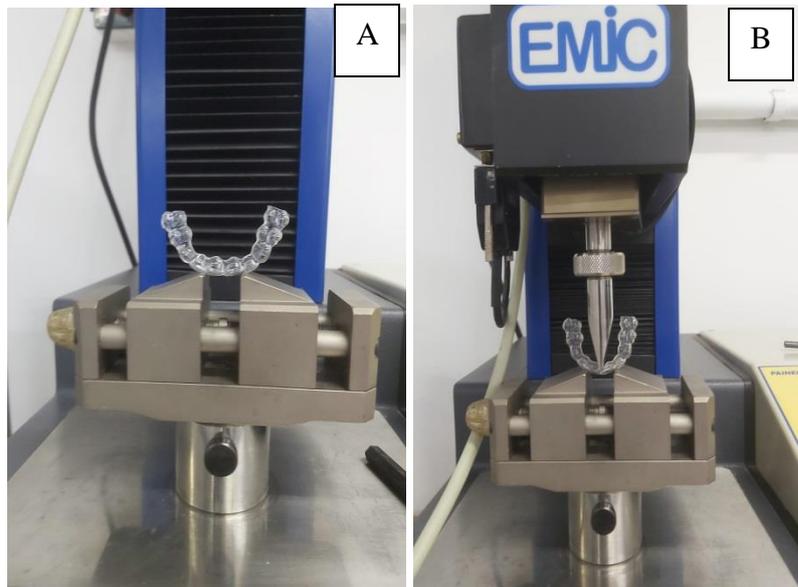


Figura 6 – Posicionamento para realização do ensaio de flexão (A). Atuador exercendo força no alinhador posicionado na base de flexão em 3 pontos (B).

4.6 Análise estatística

Foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilks em todos os grupos estudados, constatando sua normalidade (Minitab Student). Os resultados de força e dimensionais, de antes e depois da ciclagem térmica, foram comparados através do teste t-pareado (Primer of Biostatistic). O nível de significância de todos os testes foi de 5%.

5. RESULTADOS

Após a reconstrução dos *datasets* gerados pelo Micro-CTOs resultados obtidos na análise de micro-CT e no ensaio de flexão estão apresentados na tabela abaixo. Média±desvio padrão dos resultados. Letras sobrescritas diferentes indicam diferença entre os grupos.

Tabela 1. Resultados do ensaio de flexão e microtomografia computadorizada. Nas colunas, letras sobrescritas diferentes indicam diferença estatisticamente significante.

	FLEXÃO	MICRO CT		
Grupo	Força (gf)	Volume (mm ³)	Área (mm ²)	Espessura (mm)
G1	973,4 ± 57,88 ^A	162,574 ± 11,366 ^A	984,97 ± 54,17 ^A	5,41 ± 0,09 ^A
G1D	968,7 ± 54,03 ^A	157,444 ± 25,540 ^A	967,32 ± 128,51 ^A	5,81 ± 0,33 ^A
G2	1185 ± 87,16 ^A	177,477 ± 15,511 ^B	1062,32 ± 64,87 ^A	5,83 ± 0,48 ^B
G2D	1168 ± 90,55 ^A	187,709 ± 9,273 ^C	1117,07 ± 104,07 ^A	6,21 ± 0,61 ^C

A força de flexão dos alinhadores não apresentou diferença estatisticamente significante entre os grupos tanto para resfriamento somente, quanto para condição de aquecimento e resfriamento ($p>0,05$). O mesmo se deu para os ensaios de área.

O volume médio dos alinhadores aumentou em 5,76% para a condição de resfriamento e aquecimento ($p<0,05$). Quando empregado somente o resfriamento não foi encontrada diferença estatisticamente significante ($p>0,05$).

A espessura média dos alinhadores também aumentou em 6,51% para a condição de resfriamento e aquecimento ($p<0,05$). Quando empregado somente o resfriamento não foi encontrada diferença estatisticamente significante ($p>0,05$).

Ao serem submetidos ao envelhecimento por termociclagem, as amostras tiveram contato com água.

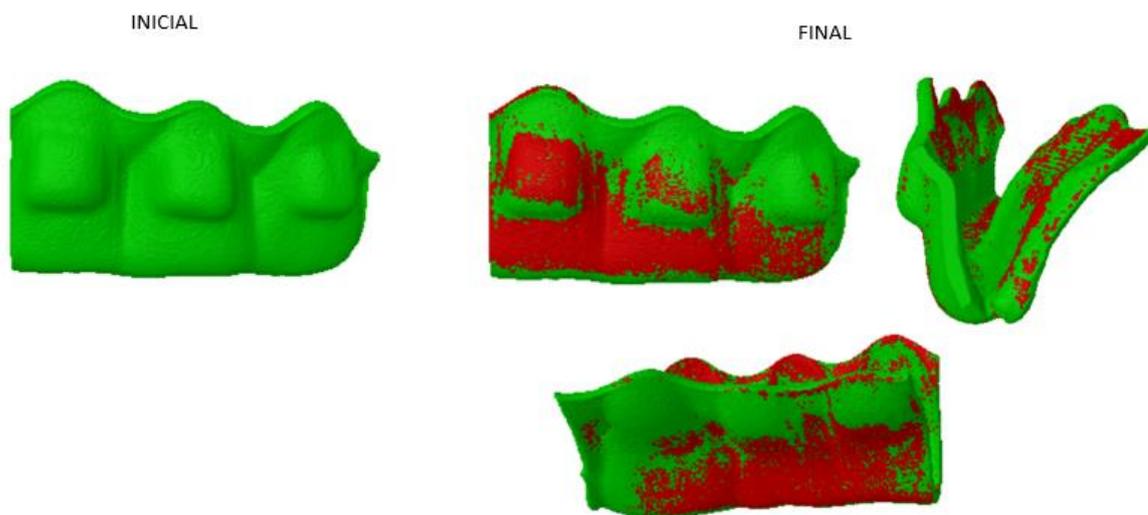


Figura 7- Modelo tridimensional obtido através da análise de μ CT. A imagem mostra o escaneamento inicial (em verde) e a sobreposição do depois (em vermelho), após os ciclos de resfriamento do alinhador.

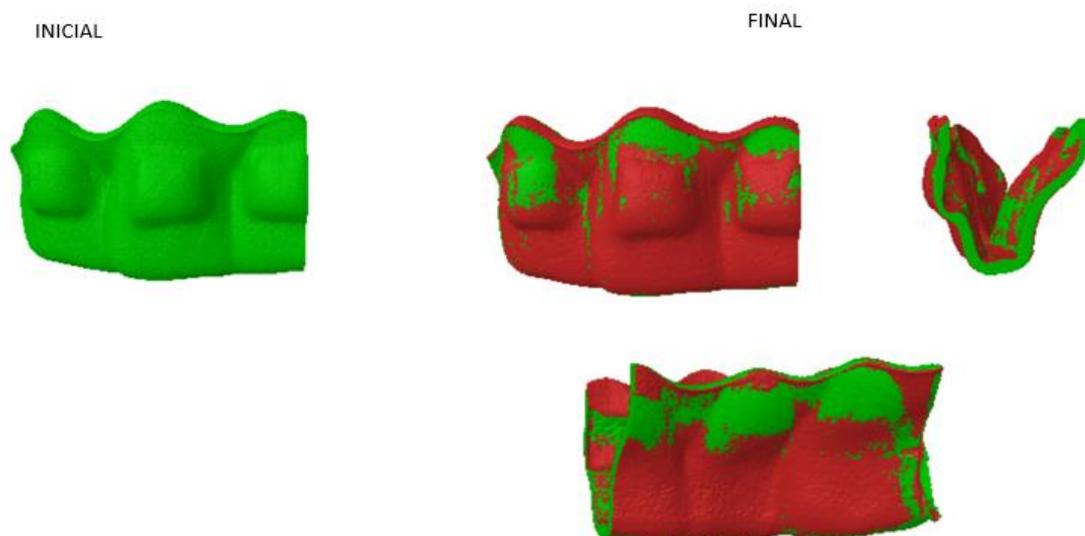


Figura 8 - Modelo tridimensional obtido através da análise de μ CT. O escaneamento inicial (em verde) e a sobreposição do depois dos ciclos de aquecimento e resfriamento do alinhador (em vermelho).

6. DISCUSSÃO

As propriedades mecânicas do material do sistema Invisalign raramente são exploradas devido à inacessibilidade da matéria-prima protegida por patente. (FANG *et al.* 2020). Estudos foram realizados analisando as propriedades físico-químicas dos diversos polímeros de alinhadores e também mecânicas em ambientes secos e úmidos, submetidos a mudanças de temperatura, envelhecendo-os ou não; através de metodologias como: a espectroscopia infravermelha, colorimetria, microscopia eletrônica de varredura, etc. A maioria dos estudos realizados em ambiente laboratorial mostrou resultados sem significância estatística. Este estudo reportou um ponto importante de variação do material que pode influenciar na sua performance clínica.

Neste estudo, foram investigadas alterações nas propriedades mecânicas e dimensionais do material Smartrack Invisalign submetendo, na forma de alinhadores, ao processo de envelhecimento artificial às temperaturas de 5°C, 37°C e 55°C. A análise dimensional foi realizada através do método de escaneamento em microtomografia computadorizada. A flexibilidade foi avaliada pelo ensaio de flexão em 3 pontos.

As intemperes térmicas podem ocorrer nos alinhadores desde o momento da fabricação (incluindo o método), passando pelo transporte até os consultórios até a manipulação por parte dos pacientes. O presente trabalho investigou os efeitos das variações térmicas em ambiente úmido controlado, porém não utilizados por pacientes. A realização em condições laboratoriais, como a maioria dos estudos anteriormente realizados, limita a nossa compreensão sob o ponto de vista do comportamento mecânico dos alinhadores no ambiente oral.

FANG *et al* em 2020, avaliaram a mudanças nas propriedades mecânicas, morfologia e estrutura do material Invisalign bem como sua composição no meio bucal antes e após 2 semanas e constatou que após 2 semanas de uso não mostrou diferenças estatísticas. Este estudo, apesar de ser *in vitro*, corrobora com tal achado, uma vez que não foram encontradas diferenças da mesma maneira.

Em um artigo publicado em 2015, BRADLEY *et al.*, compararam as propriedades mecânicas dos alinhadores LD30 não utilizados e recuperados clinicamente. Descobriram que após o uso clínico, o módulo de elasticidade e a dureza foram significativamente mais baixos, e o material tornou-se mais frágil e menos resistente à fratura. Neste estudo não houve diferença estatisticamente significativa após o envelhecimento artificial. Clinicamente é impossível isolar as variáveis temperatura e tensão, portanto é provável que as modificações ocorridas clinicamente sejam devido às tensões durante o uso. Estudos futuros avaliando o efeito das tensões nas propriedades flexurais dos alinhadores devem ser realizados para investigar tal fato.

Estudos como os de IHSEN *et al.* (2019), indicam que a absorção de água pode contribuir para o relaxamento das tensões dos materiais termoplásticos. As propriedades elásticas de alinhadores de polietileno tereftalato glicol (PETG) foram investigadas *in vitro* sob mudanças extremas de temperatura simuladas por termociclagem, temperatura ambiente e absorção de água. Os resultados deste estudo contribuem para a compreensão da degradação clinicamente bem conhecida dos alinhadores ortodônticos durante o tempo de uso. A alternância de temperaturas com o aquecimento até a temperatura intraoral e a absorção de água podem reduzir o módulo de Young do material e, portanto, promover a diminuição das forças ortodônticas resultantes. Portanto além da tensão durante o uso o grau de hidratação é outro fator que deve ser levando em conta. Neste estudo foi simulada a hidratação,

pois a técnica experimental empregada consiste na imersão em líquido durante o tratamento térmico.

XIANG *et al.*, em 2021, pesquisaram os efeitos de força de dois tipos de alinhadores translúcidos modificados com glicol tereftalato de polietileno (PETG) imersos em saliva artificial e constatou que a força fornecida por ambos os materiais diminuiu após a imersão da saliva artificial, e a força gerada pelos alinhadores modificados exibiu melhor estabilidade do que os alinhadores convencionais. Isto pode não ocorrer neste estudo devido ao material patenteado diferenciado (smarttrack).

Neste presente estudo, os alinhadores, foram analisados em ambiente úmido, alterando a cadeia polimérica e absorvendo líquido. O contato com a água, pode induzir também a uma ruptura das ligações de hidrogênio intracadeias e/ou intercadeias e modificar o volume livre dos polímeros. Um novo estudo para avaliar o aumento de peso dos alinhadores pela absorção de líquido se faz necessário. A água absorvida pode eliminar substâncias solúveis em polímeros, o que acelera o processo de degradação. Por outro lado, descobriu-se que o envelhecimento térmico aumenta as propriedades mecânicas como o módulo de Young e a tensão de tração dos polímeros (FANG *et al.*, 2013). Porém neste estudo o tempo simulado de 1 semana (tempo de uso clínico), não promoveu modificações no módulo de elasticidade, indo contra o reportado neste estudo.

DALAIE *et al.* em 2021, relataram que a mecânica com alinhadores se dá pelo máximo contato do polímero com a superfície dentária, conseguindo assim, exercer a força e o movimento ortodôntico desejados. O grau em que os movimentos ortodônticos planejados são efetivamente alcançados depende de muitas variáveis, entre as quais o espaço entre o dente e o alinhador (LOMBARDO *et al.*, 2020). Por isso este trabalho estudou as possíveis alterações nas suas propriedades mecânicas

e nas dimensões (espessura, área e volume), pois, caso essas alterações ocorram, podem comprometer a eficácia dos tratamentos.

A escolha pelo método de mensuração através de microtomografia foi devido à precisão do método, que é capaz de avaliar alterações de volume de canais radiculares, sendo muito utilizado na endodontia. (SIQUEIRA JR *et al.*, 2020; VIEIRA *et al.*, 2020). Até o presente momento não existem trabalhos de avaliação dimensional de alinhadores estéticos utilizando esta metodologia.

A análise da variação de volume, área e espessura através do μ CT, constatou que: o G1 não apresentou diferença estatisticamente significativa, quando submetendo as amostras somente à condição de resfriamento ($p > 0,05$); ao passo que o G2 apresentou diferença estatística em sua espessura e volume com aumento de 6,51% e 5,76% respectivamente ($p < 0,05$). Portanto pôde-se concluir que foi o aquecimento que gerou as modificações dimensionais no material.

O aumento da espessura nos alinhadores submetidos ao aquecimento, pode ter ocorrido devido à sorção proporcionada pelo ambiente úmido. A presença de umidade é um fator que o estudo resolveu adotar, pois ela ocorre em condições reais de utilização. O aumento de espessura pode ter ocorrido durante o aquecimento devido à expansão (dilatação) do polímero, o que não ocorre quando o material é somente resfriado.

Não houve diferença estatística nas áreas, antes e depois da exposição a temperatura ($p > 0,05$). Isto ocorreu devido a relação quadrática (da área) com a espessura (linear), e da relação cúbica (volume) com a espessura (linear). A expansão em proporção volumétrica pode gerar ineficiência do tratamento (LOMBARDO *et al.*, 2020).

A força para flexionar os alinhadores não apresentou diferenças, tanto para o resfriamento ($p > 0,05$) quando para o grupo que foi aquecido e resfriado ($p > 0,05$),

portanto o material não modifica a sua flexibilidade/rigidez quando é aquecido e/ou resfriado. Portanto se um tratamento sofre interferência pelo calor úmido, ela pode ser atribuída à adaptação pela variação de volume, e não a mudança de propriedades do material *Smartrack* LD30. Essa modificação volumétrica pode gerar forças subclínicas aumentando o tempo de tratamento (IHSSSEN *et al.*,2019).

Um ponto interessante observado neste presente estudo é que, a utilização do alinhador na faixa de temperatura de 5°C a 37° C (temperatura corporal do paciente), não modifica o material nem o alinhador, portanto a utilização em 37°C constante, não geraria nenhuma perda de eficiência no tratamento ortodôntico. Um paciente que utilize o alinhador seguindo as recomendações poderá desta forma, otimizar os resultados clínicos.

As observações e resultados obtidos se aplicam ao *Smartrack* LD30, portanto estudos investigando o efeito do resfriamento e aquecimento comparando com outras marcas seriam importantes para orientação dos pacientes e otimização dos resultados.

O estudo *in vitro* realizado permitiu, dentro das suas limitações, responder algumas questões. Porém, existem variáveis que poderiam interferir nos resultados que só ocorreriam em estudos clínicos (força mastigatória e variação de pH). Outro ponto, é que já que não existe correlação do resfriamento com modificações dos alinhadores, pode-se sugerir que sejam realizados estudos correlacionando aquecimento com o tempo de tratamento.

7. CONCLUSÕES

O resfriamento não gerou alterações dimensionais e na flexibilidade dos alinhadores, já quando foram submetidos ao aquecimento, ocorreu alteração volumétrica e linear (espessura), com aumento de aproximadamente de 6%, porém, assim como no resfriamento, não modificou a flexibilidade dos alinhadores Invisalign. Estudos clínicos são necessários para avaliar como essas variáveis podem interferir no resultado do tratamento ortodôntico.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barone S, Paoli A, Razionale AV, Savignano R (2016). Computational design and engineering of polymeric orthodontic aligners S. Barone. *Int J Numer Meth Biomed Engng*.

Bradley T, Teske L, Eliades G, Eliades T (2015). Do the mechanical and chemical properties of Invisalign™ appliances change after use? A retrieval analysis. *Eur J Orthod* 38(1):27-31.

Bucci R, Rongo R, Levatè C, Michelotti A, Barone S, Razionale AV, D'Antonio V (2019). Thickness of orthodontic clear aligners after thermoforming and after 10 days of intraoral exposure: a prospective clinical study. *Progress in Orthodontics*, 20:36.

Dalaie K, Fatemi SM, Ghaffari S (2021). Dynamic mechanical and thermal properties of clear aligners after thermoforming and aging. *Prog Orthod*. 28, 22(1):15.

Daniele V, Macera L, Taglieri G, Di Giambattista A, Spagnoli G, Massaria A, Messori M, Quagliarini E, Chiappini G, Campanella V, Mummolo S, Marchetti E, Marzo G, Quinzi V (2020). Thermoplastic disks used for commercial orthodontic aligners: complete physicochemical and mechanical characterization. *Materials (Basel)* 13, e1–e18.

Dupaix R.B, Boyce M.C (2005). Finite strain behavior of poly (ethylene terephthalate) (PET) and poly (ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Polymer (Guildf)* 46, 4827–4838.

Elkholy F, Schmidt F, Jäger R, Lapatki B.G (2016). Forces and moments delivered by novel, thinner PET-G aligners during labiopalatal bodily movement of a maxillary central incisor: an in vitro study. *Angle Orthod*. 86, 883–890.

Elshazly T.M, Keilig L, Alkabani Y, Ghoneima A, Abuzayda M, Talaat S, Bourauel C.P (2021). Primary Evaluation of Shape Recovery of Orthodontic Aligners Fabricated from Shape Memory Polymer (A Typodont Study). *Dent. J.* 9, 31.

Fang, D., Zhang, N., Chen, H., Bai, Y., 2013. Dynamic stress relaxation of orthodontic thermoplastic materials in a simulated oral environment. *Dent. Mater. J.* 32 (946–951), 946–951, 21.

Fang D, Li F, Bai Y, Will B (2020). Changes in mechanical properties, surface morphology, structure and composition of Invisalign material in the oral environment. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* 157, 6.

Galan- Lopez L, Barcia- Gonzalez J, Plasencia E (2019). A systematic review of the accuracy and efficiency of dental movements with Invisalign. *Korean J Orthod.* 49(3):140-149

Gale MS, Darvell BW (1999). Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J. Dent.* 27, 89–99.

Ihsen BA, Willmann JH, Nimer A, Drescher D (2019). Effect of in vitro aging by material. *J. Orofac. Orthop.* 80, 292–303.

Jiang Q, Li J, Mei L, Du J, Levrini L, Abbate GM, Li H (2018). Periodontal health during orthodontic treatment with clear aligners and fixed appliances: a metanalysis. *J. Am. Dent. Assoc.* 149, 712–720.

Kesling HD (1945). The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am. J. Orthod. Oral Surg.* 31, 297–304.

Kohda N, Iijima M, Muguruma T, Brantley WA, Ahluwalia KS, Mizoguchi I (2013). Effects of mechanical properties of thermoplastic materials on the initial force of thermoplastic appliances. *Angle Orthod.* 83, 476–483.

Kuo E, Miller RJ (2003). Automated custom-manufacturing technology in orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 123(5):578-81.

Lima C, Barbosa A, Ferreira C, Ferretti M, Aguiar F, Lopes S, Fidel S, Silva E (2021). Influence of ultraconservative access cavities on instrumentation efficacy with XP-endo Shaper and Reciproc, filling ability and load capacity of mandibular molars subjected to thermomechanical cycling. *Int Endod J* 54, 1383-1393.

Lombardo L, Arreghini A, Maccarrone R, Bianchi A, Scalia S, Siciliani G (2015). Optical properties of orthodontic aligners—spectrophotometry analysis of three types before and after aging. *Prog. Orthod.* 16, 1–8.

Lombardo L, Palone M, Longo M, Arveda N, Nacucchi M, De Pascalis F, Spedicato GA, Siciliani G (2020). MicroCT X-ray comparison of aligner gap and thickness of six brands of aligners: an in-vitro study. *Prog. Orthod.* 21, e1–e12.

Lopes HP, Elias CN, Batista MMD, Lopes WSP, Amaral G, Souza LC, Siqueira JF Jr (2012). Buckling resistance of pathfinding endodontic instrument. *Journal of Endodontics* 38, 402-404.

Martorelli M, Gerbino S, Giudice M, Ausiello P (2013). A comparison between customized clear and removable orthodontic appliances manufactured using RP and CNC techniques. *Dent. Mater.* 29, e1–e10.

Memè L, Notarstefano V, Sampalmieri F, Orilisi G, Quinzi V (2021). ATR-FTIR Analysis of Orthodontic Invisalign® Aligners Subjected to Various In Vitro Aging Treatments. *Materials* 14, 818.

Ogaard B, Rølla G, Arends (1988) J. Orthodontic appliances and enamel demineralization. Part 1. Lesion development. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* 94, 68–73.

Pratto I, Busato M, Bittencourt P (2021). Thermal and mechanical characterization of thermoplastic orthodontic aligners discs after molding process. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 126 -104991.

Proffit WR, Fields HW, Sarver DM (2013). *Ortodontia contemporânea*. 5th ed. Barcelona: Elsevier Mosby.

Ryu J.H, Kwon JS, Jiang HB, Cha JY, Kim KM (2018). Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. *Korean J. Orthod.* 48, 316–325.

Siqueira Jr J, Antunes H, Perez A, Alves F, Mdala I, Silva E, Belladonna F, Rôças I (2020). The Apical Root Canal System of Teeth with Posttreatment Apical Periodontitis: Correlating Microbiologic, Tomographic, and Histopathologic Findings. *J Endod*, 46(9): 1195-1203

Vieira G, Perez A, Alves F, Provenzano J, Mdala I, Siqueira Jr J, Rôças I (2020). Impact of Contracted Endodontic Cavities on Root Canal Disinfection and Shaping. *J Endod*, 46(5): 655-661

Weir T (2017). Clear aligners in orthodontic treatment. *Aust Dent J.* 62:58–62.

Xiang B, Wang X, Wu G, Xu Y, Wang M, Yang Y, Wang Q (2021). The force effects of two types of polyethylene terephthalate glycol-modified clear aligners immersed in artificial saliva. *Nature Scientific Reports*, 11:10052.

Zhang N, Bai Y, Ding X, Zhang Y (2011). Preparation and characterization of thermoplastic materials for invisible orthodontics. *Dent. Mater. J.* 30, 954–959.