



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ODONTOLOGIA - MESTRADO



ISABELLA PRATTO

Resistência mecânica de materiais plásticos para alinhadores ortodônticos:
estudo laboratorial

Cascavel - PR
2021

ISABELLA PRATTO

Resistência mecânica de materiais plásticos para alinhadores ortodônicos: estudo
laboratorial

Exame de Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Odontologia, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade estadual do Oeste do Paraná, como requisito para obtenção do título de mestre em odontologia.

Área de concentração: Odontologia

Orientador: Prof. Dr. Mauro Carlos Agner Busato

Pratto, Isabella
Resistência mecânica de materiais plásticos para
alinhadores ortodônticos: estudo laboratorial / Isabella
Pratto; orientador Mauro Busato. -- Cascavel, 2021.
27 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) --
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências
Biológicas e da Saúde, Programa de Pós-Graduação em
Odontologia, 2021.

1. Materiais termoplásticos. 2. Alinhadores estéticos. 3.
Propriedades mecânicas. 4. Força ortodôntica. I. Busato, Mauro
, orient. II. Título.

ISABELLA PRATTO

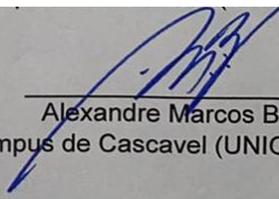
Resistência mecânica de materiais plásticos para alinhadores ortodônticos: estudo laboratorial

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Odontologia, área de concentração Odontologia, linha de pesquisa Materiais Dentários Aplicados à Clínica Odontológica, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Mauro Carlos Agner Busato

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Alexandre Marcos Bandeira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Alex Luiz Pozzobon Pereira

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Cascavel, 14 de julho de 2021.

Resistência mecânica de materiais plásticos para alinhadores ortodônticos: estudo laboratorial

RESUMO

Introdução: Os alinhadores foram introduzidos na Ortodontia como uma alternativa inovadora para os aparelhos fixos. Diferentes materiais termoplásticos podem ser empregados na sua fabricação e as características biomecânicas podem ser influenciadas por suas propriedades. Por isso, o objetivo deste estudo foi comparar a resistência mecânica de materiais termoplásticos comercialmente disponíveis e comumente utilizados pelos ortodontistas para a confecção de alinhadores *in office*. **Métodos:** Quatro diferentes plásticos utilizados para a fabricação de alinhadores ortodônticos foram selecionados: ACE 035 Essix, C+ Essix, BioArt Cristal 0.75, BioArt Cristal 1.0. Todos os materiais foram analisados antes e após a termoplastificação. Os materiais foram divididos em 8 grupos com 20 espécimes cada. Um teste de tração foi realizado e foram analisadas as seguintes variáveis: deformação elástica (DE), módulo de Young e comportamento de fratura. **Resultados:** A maior deformação elástica foi encontrada nos grupos com 100% de PETG na composição (BioArt). Contrapondo os grupos que apresentam o Polipropileno na composição (C+), no qual houve a menor DE. O módulo de Young para os grupos sem PETG na composição, apresentaram menores valores (ACE 035 e C+). Por outro lado, os grupos com PETG na composição, apresentaram valores maiores. Os materiais que possuem PETG na composição, apresentaram, em sua maioria, fratura frágil. Diferente do material C+, que apresentou fratura dúctil, em sua totalidade. **Conclusões:** As propriedades mecânicas dos materiais termoplásticos usados na fabricação de alinhadores ortodônticos devem ser avaliadas após a termoformação. Os materiais com PETG apresentaram maior deformação elástica e maiores módulos de Young do que os grupos com polipropileno. Em relação ao tipo de fratura, a composição do plástico também foi determinante com relação ao comportamento dos plásticos sob o stress mecânico.

Palavras-chave: Materiais termoplásticos, Alinhadores estéticos, propriedades mecânicas, força ortodôntica.

Mechanical resistance of plastic materials for orthodontic aligners: laboratory study

ABSTRACT

Introduction: Aesthetic aligners were introduced in orthodontics as an innovative alternative to fixed appliances. Different thermoplastic materials can be used in their manufacture, and their biomechanical characteristics can be influenced by their properties. Furthermore this study aimed to identify factors that influence the physical properties of commercially available thermoplastic materials commonly used by orthodontists. **Methods:** Four different plastics used for the production of aesthetic orthodontic aligners were selected: ACE 035 Essix, C+ Essix, Crystal 0.75, Crystal 1.0. All materials were analyzed before and after thermoplasticization. The materials were divided into 8 groups with 20 specimens each. A traction test was performed, and the following variables were analyzed: elastic deformation, Young modulus, and fracture behavior. **Results:** The greatest elastic deformation was found in the groups with 100% PETG in the composition, opposing the groups that have polypropylene in the composition, with the lowest stretch tension. Young's modulus for groups without PETG in the composition had lower values. On the other hand, groups with PETG had higher values. The materials that have PETG in the composition, showed, for the most part, brittle fracture. Different from the material with Polypropylene, which presented ductile fracture, in its entirety. **Conclusions:** The mechanical properties of thermoplastic materials used in the manufacture of orthodontic aligners should be evaluated after thermoforming. The materials with PETG showed higher elastic deformation and greater Young modules than the groups with polypropylene. Regarding the type of fracture, the composition of the plastic was also determinant in relation to the behavior of plastics under mechanical stress.

Keywords: Thermoplastic materials, Clear Aligners, mechanical properties, orthodontic force.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espécimes com as medidas de dimensão indicados	11
Figura 2: Célula de carga de 100N	12
Figura 3: Espécime posicionado para o teste de tração	13
Figura 4: Gráfico de Deformação elástica	15
Figura 5: Gráfico Módulo de Young	16
Figura 6: Comportamento de fratura	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materiais termoplásticos utilizados neste estudo.....	10
Tabela 2: Comparação dos grupos de materiais na deformação elástica	15
Tabela 3: Comparação dos grupos de materiais no módulo de Young	16
Tabela 4: Frequência absoluta e comparação do tipo de fratura considerando o material e a Termoplastificação.....	17

Dissertação elaborada e formatada
conforme as normas das publicações científicas :

Dental Press Journal of Orthodontics

Disponível em:

<https://www.scielo.br/journal/dpjo/about/#instructions>

SUMÁRIO

1 Introdução	8
2 Materiais e Métodos	10
3 Resultados	15
4 Discussão	19
5 Conclusões.....	22
6 Referências Bibliográficas.....	23
7 Anexo – normas da Revista Dental Press.....	26

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda pela Ortodontia em adultos, aumenta também a demanda por aparelhos ortodônticos estéticos que possam substituir os braquetes de metal comumente utilizados. Nos últimos anos, as exigências estéticas e o uso de alinhadores transparentes em tratamentos ortodônticos têm aumentado¹. Os braquetes ortodônticos convencionais frequentemente aumentam o risco de lesões por cárie e causam gengivite e periodontite devido ao acúmulo de placa ao redor². Isso resulta em prejuízo da saúde bucal, além de má estética durante o tratamento ortodôntico³. Com o objetivo de amenizar este problema, alinhadores ortodônticos transparentes foram introduzidos como alternativas para braquetes e fios. Os alinhadores estéticos, confeccionados com material plástico transparente, podem ser facilmente inseridos e removidos e não afetam a capacidade de mastigação do paciente^{4,5}.

Os alinhadores transparentes termoformados foram introduzidos por Kesling em 1945 para pequenas correções de posição dentárias^{6,7}. Desde a introdução dos procedimentos de design auxiliado por computador - fabricação assistida por computador (CAD-CAM), esta tecnologia ganhou uso clínico generalizado e hoje também é utilizada para movimentos dentários mais complexos^{8,9,10}. Como sua popularidade cresceu enormemente, os alinhadores ganharam profunda relevância na Ortodontia moderna¹¹. Em 2018, apenas um dos fornecedores líderes no mercado produziu alinhadores para o tratamento de mais de um milhão de pacientes¹².

Outro fator a ser considerado é que nem todos os alinhadores são fabricados da mesma forma e os que estão atualmente no mercado são produtos baseados em diferentes tecnologias de digitalização, software de configuração, material, espessura, transparência, qualidade, técnica de acabamento e protocolo clínico^{13,14}. Em linhas gerais há duas formas de se trabalhar com alinhadores, sendo uma através da terceirização, onde a confecção é realizada por empresas, e o outro método seria da confecção *in Office*, na qual o próprio profissional ou sua equipe realizam esta produção^{7,8}.

Diferentes materiais termoplásticos podem ser empregados na sua fabricação e suas características biomecânicas podem ser influenciadas por suas propriedades¹⁵. Dentre os diversos materiais termoplásticos utilizados, há, atualmente uma predominância na utilização do polietileno tereftalato glicol (PETG) modificado pelos fabricantes¹⁶. Pode-se destacar também a utilização de polipropileno, policarbonato, poliuretanos termoplásticos e copoliéster⁶.

Os alinhadores transparentes também vêm em uma variedade de espessuras diferentes, de 0,50 mm a 1,5 mm¹³. Semelhante ao seu material de construção, isso pode afetar suas propriedades mecânicas e, portanto, seu desempenho. O ideal, para fornecer movimento fisiológico dos dentes, os alinhadores transparentes deveriam ser capazes de exercer forças leves e constantes durante seu uso^{13,14}.

Desta forma, a quantidade de movimento dentário, depende das composições e espessuras dos materiais termoplásticos¹⁷. Além disso, após o início do uso de um alinhador estético, o dente é imediatamente submetido a uma grande força ortodôntica que diminui significativamente com o tempo¹⁸. Portanto, no sistema de tratamento atual, o alinhador deve ser substituído a cada 14 dias em média. Para um tratamento eficaz com alinhadores, são necessários materiais termoplásticos capazes de exercer constantemente uma força ortodôntica adequada para a movimentação dentária^{19,20}.

Portanto, devido à escassez de estudos sobre a relação entre o comportamento da força ortodôntica exercida pelos alinhadores e a mudança nas propriedades físicas dos materiais termoplásticos, o objetivo deste estudo foi avaliar comparativamente a resistência mecânica de quatro materiais termoplásticos comercialmente disponíveis e comumente utilizados pelos ortodontistas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se de um estudo laboratorial que avalia comparativamente, através de um teste de tração, os parâmetros mecânicos de quatro diferentes plásticos utilizados para a fabricação de alinhadores estéticos ortodônticos, antes e após a termoplastificação.

2.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA:

Quatro diferentes marcas foram selecionadas por serem comumente utilizadas para fabricação de alinhadores estéticos (tabela 1):

1. Plástico ACE 035 Essix Clear Aligner – Dentsply Sirona®
2. Plástico C+ Essix Clear Aligner – Dentsply Sirona®
3. Plástico Cristal 0,75 – Bio-Art®
4. Plástico Cristal 1,0 – Bio-Art®

Tabela 1: Materiais termoplásticos utilizados neste estudo

Produtos	Fabricante	Composição	Espessura
Plástico ACE 035	Dentsply Sirona®	PETG (95%) e Polipropileno (5%)	0.88 mm
Plástico C+	Dentsply Sirona®	Polipropileno	1.0 mm
Plástico Cristal	Bio-Art®	PETG	0.75 mm
Plástico Cristal	Bio-Art®	PETG	1.0 mm

2.2 CÁLCULO AMOSTRAL

O cálculo amostral foi realizado baseado em distribuições de probabilidades da família de testes F (ANOVA a 2 Critérios), para análise das diferenças da variável deformação elástica quando comparados os grupos formados pela combinação das duas variáveis: material e termoplastificação. O tamanho de efeito utilizado foi de 0.3, erro tipo 1(α) de 0.05, poder de análise (erro β) de 0.85 e sete graus levando a um número de 160 corpos de provas, sendo um n=20 por grupo. O cálculo amostral foi realizado no programa Gpower, versão 3.1.9.2 – Universidade de Düsseldorf.

2.3 GRUPOS:

Cada marca foi dividida em dois grupos de 20 espécimes cada:

1. Original de fábrica (sem termoplastificação)
2. Termoplastificado

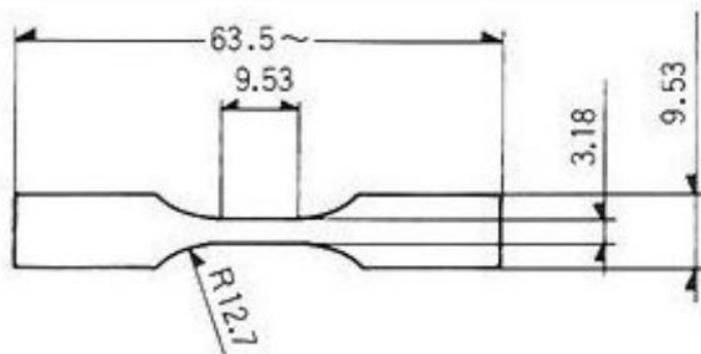
Totalizando 8 grupos e 160 espécimes:

1. ACE 035 – sem termo
2. ACE 035 – termo
3. C+ Essix – sem termo
4. C+ Essix – termo
5. BioArt 0.75 – sem termo
6. BioArt 0.75 – termo
7. BioArt 1.0 – sem termo
8. BioArt 1.0 - termo

2.4 ESPÉCIMES:

Metade dos materiais selecionados foram termoplastificados, seguindo as instruções de cada fabricante, utilizando uma máquina de moldagem a vácuo (PlastVac P7- Bio-Art®). Após isso, todos os materiais foram cortados utilizando uma máquina de fresagem controlada por computador (Router Laser Visutec®). Para cumprir os requisitos das Normas ISO EN ISO 527-1: 2012 e 527-2: 2012 (figura1), os espécimes foram produzidos com uma tolerância de $\pm 0,1$ mm em largura e espessura¹⁹.

Figura 1: Espécime com as medidas de dimensão indicados (dimensões em mm)



2.5 TESTE DE TRAÇÃO:

Todos os espécimes foram testados em tração com uma máquina de teste universal (HD xt – Stable micro system®) (figura 2). A máquina de teste foi equipada com uma célula de carga

de 100N (figura 3). Todas as medições foram realizadas a uma taxa de deformação de 10 mm por segundo (figura 4). Para cada amostra, foram obtidos diagramas de tensão e deformação individuais. E foram analisadas as seguintes variáveis:

1. Deformação elástica;
2. Módulo de Young (MY) ;
3. Comportamento da fratura;

Figura 2: Célula de carga de 100N



Figura 3: Espécime posicionado para o teste de tração



2.6 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS ELÁSTICOS

A deformação elástica é a capacidade de um material de suportar cargas sem falhas do material. Materiais com alta resistência à tração são menos propensos a fraturar sob carga²³.

O módulo de Young é definido como o resultado da relação da força aplicada e a deformação resultante. Assim, quanto menor o módulo de Young, menores são as forças elásticas resultantes na mesma faixa de deflexão. Materiais elásticos ortodônticos com um pequeno módulo de Young, podem produzir forças ortodônticas menores, o que é considerado como favorável, pois reduzem o risco de reabsorção radicular^{22,23}.

O comportamento de fratura pode ser: frágil ou Dúctil. Uma fratura frágil é quando o material sofre uma ruptura repentina. Já na fratura dúctil, o material sofre estrangulamento com alongamento do espécime de vários milímetros²⁴

2.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados quantitativos (Deformação elástica e Módulo de Young) foram avaliados quanto ao padrão de distribuição por meio do teste de Shapiro-Wilk, assim como a homogeneidade das variâncias por meio do teste de Levene. Uma vez atendidos estes pressupostos, realizou-se a comparação dos grupos através do teste paramétrico de análise

de variância – ANOVA a dois criterios, com pós-teste de Tukey. A comparação dos grupos para a variável modo de fratura foi feita pelo teste Qui-quadrado. As diferenças foram consideradas estatisticamente significativas ao nível de 5% ($p < 0.05$). As análises estatísticas e os gráficos foram realizados no programa Jamovi, versão 1.2 (The jamovi project (2020) - <https://www.jamovi.org>).

3 RESULTADOS

3.1 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

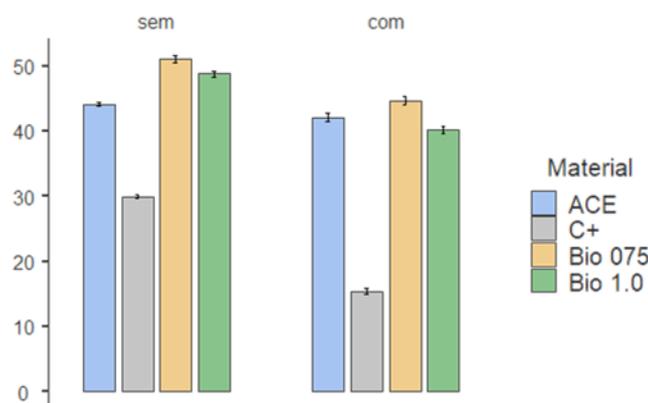
A maior deformação elástica foi encontrada nos grupos BioArt 0.75 – sem termo e BioArt 1.0 – sem termo, com 51.0 Mpa e 48.7 MPa, respectivamente, não apresentando diferenças estatisticamente significativas entre si. Enquanto a mais baixa foi obtida no grupo C+ Essix – termo, com 15.4 MPa. Houve uma diferença estatisticamente significativa na média de deformação elástica, com redução após termoplastificação, comparando grupos do mesmo produto, exceto para o plástico ACE (Tabela 2 e Figura 5).

Tabela 2- Comparação dos grupos de materiais, com e sem termoplastificação, com médias e desvios-padrão da deformação elástica em Mpa.

<i>Material</i>	<i>Termoplastificação</i>	<i>Deformação elástica Mpa e Médias e D.P.</i>	
ACE	sem	44.1 ^a	1.24
	com	42.1 ^{ac}	2.29
C+	sem	29.9 ^d	0.822
	com	15.4 ^e	1.62
Bio 075	sem	51.0 ^f	2.02
	com	44.6 ^a	2.45
Bio 1.0	sem	48.7 ^f	1.61
	com	40.2 ^c	2.17

Pelo menos uma letra igual indica semelhança estatística. Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa. ANOVA a dois Critérios para as variáveis material, termoplastificação e sua combinação ($p < 0.001$).

Figura 4: Gráfico de deformação elástica



3.2 MÓDULO DE YOUNG

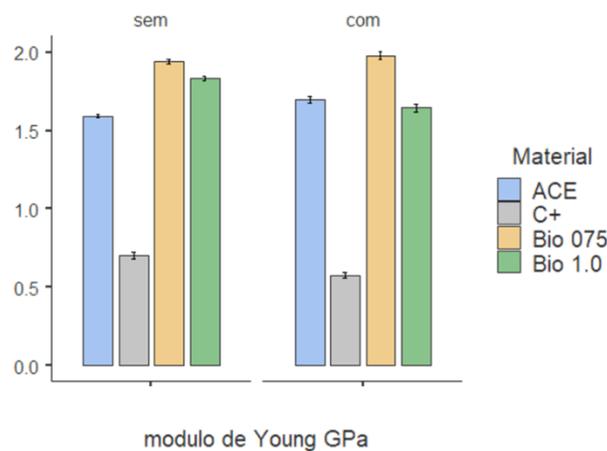
O Módulo de Young médio mais alto foi encontrado para os grupos BioArt 0.75 – sem termo e BioArt 0.75 com termo, com 1.94 GPa e 1.98 GPa, respectivamente, nos quais não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. O mais baixo foi encontrado para o C+ Essix – termo, com 0.577 GPa. Ao se comparar os mesmos produtos, com ou sem termoplastificação, percebe-se que entre os grupos do plástico ACE, o termoplastificado, apresentou um maior módulo de Young. Diferente dos grupos C+ e Bio-Art 1.0, em que a termoplastificação diminuiu o módulo de Young. O grupo BioArt 0.75 não apresentou alteração do módulo de Young após a plastificação (tabela 3 e figura 6).

Tabela 3- Comparação dos grupos de materiais, com e sem termoplastificação, com médias e desvios-padrão do módulo de Young em Gpa.

<i>Material</i>	<i>Termoplastificação</i>	<i>Módulo de Young GPa e Médias e D.P.</i>	
ACE	sem	1.59 ^a	0.0462
	com	1.70 ^b	0.0708
C+	sem	0.702 ^c	0.0764
	com	0.577 ^d	0.0564
Bio 075	sem	1.94 ^e	0.0468
	com	1.98 ^e	0.0989
Bio 1.0	sem	1.83 ^f	0.0463
	com	1.64 ^{ab}	0.0901

Pelo menos uma letra igual indica semelhança estatística. Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa. ANOVA a dois Critérios para as variáveis material, termoplastificação e sua combinação ($p \leq 0.001$).

Figura 5: Gráfico Módulo de Young



3.3 COMPORTAMENTO DE FRATURA

Em relação ao tipo de fratura, considerando o material, percebe-se que os grupos com o plástico ACE 035 apresentaram em 82.5% dos espécimes, fratura frágil, ou seja, fraturaram repentinamente. Em contraste, nos grupos do plástico C+ Essix, todos os espécimes sofreram fratura dúctil, ou seja, sofreram deformação de vários centímetros, com o alongamento do espécime. Por outro lado, nos grupos BioArt 075 e 1.0 com e sem termoplastificação houve um equilíbrio no tipo de fratura, independente da espessura do material (tabela 4).

Levando em consideração os grupos com ou sem termoplastificação, percebe-se que nos grupos sem termoplastificação, a maioria apresentou fratura frágil. Em contrapartida, nos grupos com termoplastificação a maioria apresentou fratura dúctil. Na figura 7, uma imagem representativa dos comportamentos de fratura.

Tabela 4: Frequência absoluta e comparação do tipo de fratura considerando o material e a Termoplastificação.

Material	Termoplastificação	Tipo de fratura	
		Fratura Frágil	Fratura Dúctil
ACE	sem ^a	15	5
	com ^a	18	2
C+	Sem ^b	0	20
	com ^b	0	20
Bio 075	sem ^a	18	2
	com ^c	5	15
Bio 1.0	sem ^{ad}	14	6
	com ^{cd}	8	12

Pelo menos uma Letra igual indica semelhança estatística. Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa (Qui-Quadrado partição, $p < 0.001$)

Figura 6: Comportamento de fratura



Imagem à esquerda: Fratura Frágil
Imagem à direita: Fratura Dúctil

4 DISCUSSÃO

Com a grande demanda por alinhadores na clínica Ortodôntica, há um desafio aos profissionais no sentido de se atualizarem e buscarem conhecer mais sobre esta nova técnica⁶. Em linhas gerais, o ortodontista pode trabalhar com alinhadores, através da terceirização, onde empresas fabricam o dispositivo, como também na modalidade *in office*, na qual o próprio profissional e/ou sua equipe realizam esta produção¹³. Neste último caso, o ortodontista se depara com diferentes materiais termoplásticos disponíveis no mercado, sendo que as características biomecânicas destes podem variar na dependência da composição do material¹⁵. Assim, este trabalho buscou comparar materiais com diferentes composições e espessuras no sentido de gerar informações para guiar a escolha do clínico que deseja confeccionar alinhadores *in office*.

No presente estudo, observou-se que os grupos do plástico C+, compostos por polipropileno, apresentaram um menor módulo de Young (MY). Este aspecto é favorável, visto que pode diminuir o risco de reabsorção radicular durante o movimento dentário, uma vez que materiais com um menor módulo elástico geram menor força em uma mesma faixa de deflexão, o que seria mais compatível com a força ortodôntica ótima^{22,23}. Resultados diferentes foram encontrados nos outros grupos no qual o PETG faz parte da composição principal. O PETG aumentou o MY dos materiais plásticos para alinhador. Quanto ao efeito da termoplastificação, é difícil comparar esses achados com os de outros autores que usaram protocolos diferentes para seus testes mecânicos. Por exemplo, Ihssen et al, 2019, testou somente uma marca de produto, com a composição PETG e envelhecimento acelerado. Os autores obtiveram como resultado o MY maior para os grupos testados à 22°C em comparação com seus grupos correspondentes medidos 37°C. Em nosso estudo, a termoplastificação reduziu o MY nos grupos C+ e Bio-Art 1.0.

Foi verificado, no presente trabalho, que a deformação elástica de todos os materiais diminuiu após a termoplastificação (TP), exceto para o plástico ACE. Com o aumento da espessura dos materiais, a deformação elástica diminuiu (Tabela 3), assim como no estudo realizado por Ryu et al, 2018. Se os materiais termoplásticos forem submetidos a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea, eles podem se deformar e diminuir facilmente em espessura²⁶, o que explicaria a redução nos valores médios desta variável. Além disso, durante a TP os materiais plásticos mudam da forma amorfa para a forma cristalina com a diminuição da temperatura, com a fase cristalina afetando as propriedades mecânicas²⁷.

Portanto, a durabilidade dos materiais termoplásticos usados para a fabricação de alinhadores estéticos deve ser avaliada antes e depois da termoformação²⁴. Como para confecção dos alinhadores necessariamente se executa a termoplastificação, pode-se afirmar que o plástico ACE foi o único que obteve estabilidade após este processo, mantendo o maior valor médio dos grupos após a termoplastificação. Maiores valores de deformação elástica garantiriam desempenho clínico mais adequado, uma vez que permitiria o alinhador suportar o stress mecânico e físico do meio bucal com uma menor chance de falhar²³.

Em relação ao comportamento de fratura, observou-se que os grupos em que a composição principal era de PETG, a fratura foi, na maioria, frágil. O grupo em que a composição é de Polipropileno (C+), as fraturas foram 100% dúcteis. Levando em consideração os grupos com ou sem termoplastificação, os grupos do plástico Bio-Art alteraram seu comportamento após a TP, passando para um predomínio de fraturas dúcteis após este processo, principalmente para a espessura de 0.75mm. Em contrapartida, no estudo realizado por Ihssen et al, 2019, quase todos os corpos de prova testados por meio de tração à 22°C apresentaram comportamento de fratura frágil. Em contraste, apenas metade dos testados à 37° apresentaram comportamento de fratura frágil, enquanto a outra metade mostrou comportamento de fratura dúctil. Todos os materiais apresentavam o PETG em sua composição²⁴.

Idealmente, um alinhador deve aplicar uma força leve que seja constante ao longo do tempo²⁵. Para exercer forças seguras e eficazes, o material ideal deve, portanto, ser bastante rígido, com alta resistência ao escoamento, capaz de garantir que a força seja aplicada dentro da faixa elástica. Em outras palavras, sua curva de relaxamento deve ser bastante plana, demonstrando sua capacidade de exercer forças constantes e contínuas ao longo do tempo²⁸. Contudo, nenhum dos quatro materiais para alinhadores testados aqui demonstraram todas essas características. Parece que a combinação de PETG com algum acréscimo de polipropileno na composição seja a chave para aliar a resistência mecânica e a memória elástica necessárias para promover ao alinhador características desejáveis. E neste ponto, o plástico ACE parece aliar estas propriedades pois apresentou respectivamente um MY médio, e uma resistência alta.

Na Ortodontia com aparelhos fixos tem-se 2 possibilidades de alteração na quantidade de força liberada e portanto, a carga dissipada sobre os dentes. Uma delas é a Ortodontia de secção transversal variável, através da variação do calibre do fio, que aumenta progressivamente durante a evolução do tratamento. Outra forma de promover alteração na magnitude da força liberada é através da utilização de fios compostos por ligas alternativas, constituídas por outros materiais (TMA, NiTi). As propriedades particulares destas ligas, entre elas, os diferentes módulos de elasticidade, permitem a sua aplicação nas várias fases do

tratamento, atuando com forças leves e constantes. Assim, pode-se utilizar fios de módulo de elasticidade baixos ao início do tratamento, quando os dentes estão desalinhados, e fios com maior módulo de elasticidade nas fases em que os dentes estão melhor alinhados e são requeridos fios com menor resiliência e que permitam um controle maior sobre o posicionamento dentário²⁹.

Realizando um exercício de analogia das propriedades dos fios ortodônticos com os plásticos ortodônticos e, baseado nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se sugerir duas alternativas: 1. Alinhadores com espessura variável- usar alinhadores menos espessos ao início do tratamento (menores módulos de elasticidade) e, à medida que a movimentação dentária ocorre, ir gradualmente aumentando a espessura dos alinhadores; 2. Alinhadores com composições diferentes- no início do tratamento poder-se-ia lançar mão de plásticos com polipropileno na composição (C+), uma vez que estes apresentam um módulo elástico menor, o que por sua vez garantiria mais resiliência e forças menores, ideais para o início do alinhamento e nivelamento dos dentes. Na sequência do tratamento, em fase intermediária, os alinhadores poderiam ser confeccionados por uma combinação de polipropileno e PETG na composição (ACE), levando a um aumento do módulo de elasticidade, permitindo uma boa resistência em conjunto com um bom grau de resiliência. Ao final do tratamento para um controle maior sobre os dentes e para a manutenção de resultados obtidos, os plásticos compostos exclusivamente por PETG (BIO-ART) entrariam para conferir a rigidez desejada para esta fase.

O presente estudo apresenta algumas limitações por ser uma análise *in vitro* que avalia o comportamento de diferentes materiais, de composição e espessura diferentes, antes e depois da fase de termoformação. As variáveis testadas podem mudar durante o período de tratamento em decorrência do estresse físico, químico e mastigatório que pode ocorrer na cavidade oral. Para indicações clínicas mais precisas, novos estudos clínicos sobre os alinhadores devem ser realizados, levando em consideração as mudanças que podem ocorrer após o stress na cavidade oral.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se então, dentro das limitações deste estudo, que:

As propriedades mecânicas dos materiais termoplásticos usados na fabricação de alinhadores ortodônticos devem ser avaliadas após a termoformação para caracterizar suas propriedades, visto que houve diferenças entre os grupos com e sem termoplastificação.

Em relação à deformação elástica, constatou-se que os grupos com 100% de PETG na composição, mostraram os maiores valores. Contrapondo os grupos que apresentam o Polipropileno na composição (C+ Essix), no qual houve a menor deformação elástica.

Já levando em consideração o módulo de Young, observa-se que os grupos sem PETG na composição, apresentaram menores valores. Por outro lado, os grupos com PETG na composição, apresentaram um maior módulo de Young.

Em relação ao tipo de fratura, percebe-se que os materiais que possuem PETG na composição, apresentaram, em sua maioria, fratura frágil. Diferente do material com Polipropileno, que apresentou fratura dúctil, em sua totalidade. Observa-se também, que antes da termoplastificação os materiais apresentam, em sua maior parte, fratura frágil, e após, um maior número de fratura dúctil.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Martorelli M, Gerbino S, Giudice M, Ausiello P. A comparison between customized clear and removable orthodontic appliances manufactured using RP and CNC techniques. *Dent Mater* 2013; 29:e1-10.
2. Ogaard B, Rølla G, Arends J. Orthodontic appliances and enamel demineralization. Part 1. Lesion development. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1988;94: 68-73.
3. Featherstone J. Dental caries: a dynamic disease process. *Aust Dent J* 2008;53:286-91.
4. Joffe L. Invisalign: early experiences. *J Orthod* 2003; 30:348-52.
5. Shalish M, Cooper-Kazaz R, Ivgi I, Canetti L, Tsur B, Bachar E, et al. Adult patients' adjustability to orthodontic appliances. Part I: a comparison between Labial, Lingual, and InvisalignTM. *Eur J Orthod* 2012; 34:724-30.
6. Fang D, Zhang N, Chen H, Bai Y. Dynamic stress relaxation of orthodontic thermoplastic materials in a simulated oral environment. *Dent Mater J* 2013; 32(6):946–951. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Dynamic-stress-relaxation-of-orthodontic-materials-Fang-Zhang/274f49d4069bd071ebd7e5f09a193b640e1eaa63>. Acesso em: 11 out. 2020.
7. Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent* 1999; 27(2):89–99
8. Elkholy F, Schmidt F, Jager R, Lapatki BG. 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* 2016; 86(6):883–890.
9. Hahn W, Zapf A, Dathe H et al. Torquing an upper central incisor with aligners—acting forces and biomechanical principles. *Eur J Orthod* 2010; 32(6):607–613.
10. Simon M, Keilig L, Schwarze J, Jung BA, Bourauel C. Forces and moments generated by removable thermoplastic aligners: incisor torque, premolar derotation, and molar distalization. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2014; 145(6):728–736.
11. Align Technology, Inc. Q4 and 2017 Corporate Fact Sheet. Disponível em: <http://www.aligntech.com/documents/Align%20Technology%20Corp%20Fact%20Sheet%202017%20Q4F.pdf>. Accessed 9 Feb 2018
12. Align Technology Inc. (2019) Q4 and 2018 Corporate Fact Sheet. Disponível em: <http://www.aligntech.com/documents/Align%20Technology%20Corp%20Fact%20Sheet%202018%20Q4.pdf>. Accessed 3 Mar 2019

13. Lombardo L, Martines E, Mazzanti V, Arreghini A, Mollica F, Siciliane G. Stress relaxation properties of four orthodontic aligner materials: a 24-hour in vitro study. *The Angle Orthodontist* 2016, v. 87, n. 1, p. 11-18, 1
14. Lombardo, Luca; Palone, Mario; Longo, Mattia; Arveda, Niki; Nacucchi, Michele; Pascalis, Fabio de; Spedicato, Giorgio Alfredo; Siciliani, Giuseppe. MicroCT X-ray comparison of aligner gap and thickness of six brands of aligners: an in-vitro study. *Progress in Orthodontics*, v. 21, n. 1, p. 1-12, 11 maio 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32390068/>. Acesso em: 03 out. 2020.
15. Jiang Q, Li J, Mei L, Du J, Levrine L, Abbate GM, LI, Huang. Periodontal health during orthodontic treatment with clear aligners and fixed appliances. *The Journal of The American Dental Association* 2018, v. 149, n. 8, p. 712-720, ago. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29921415/>. Acesso em: 08 out. 2020.
16. Dupaix R, Boyce M. Finite strain behavior of poly (ethylene terephthalate) (PET) and poly (ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Polymer* 2005, v. 46, n. 13, p. 4827-4838, jun. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386105004118> Acesso em: 03 out. 2020.
17. Kim TW, Echarri P. Clear aligner: an efficient, esthetic, and comfortable option for an adult patient. *World J Orthod* 2007; 8: 13-18.
18. Graber TM, Swain BF. *Orthodontics, current principles and techniques*. St. Louis: C.V. Mosby Co.; 1985. p. 639-667.
19. Inoue Sayuri, Yamaguchi Satoshi, Yamashiro Takashi, Imazato Satoshi. Influence of constant strain on the elasticity of thermoplastic orthodontic materials. *Dental Materials Journal* [Internet]. 2020 [cited 2021 Mar 2]; Available from: Dent Mater J
20. Deutsches Institut für Normung (2012) *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527- 1:2012)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012 (Polymers—Determination of tensile properties—Part 1: General principals (ISO 527-1:2012); German Version EN ISO 527-1:2012))
21. Din Deutsches Istitut für Normung e. V. (2012) *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO*

- 527-2:2012). Beuth Verlag GmbH, Berlin (Deutsche Fassung EN ISO 527-2:2012 (Polymers—Determination of tensile properties—Part 2: Testing conditions for moulding and extrusion materials (ISO 527-2:2012); German version EN ISO 527-2:2012))
22. Krishnan V, Davidovich Z. Biological mechanisms of tooth movement 2015, vol 2. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, United Kingdom
 23. Roylance D. Mechanical properties of materials 2008, MIT Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA
 24. Ihssen Benjamin A, Willmann Jan H, Nimer Amr, Drescher Dieter. Effect of in vitro aging by water immersion and thermocycling on the mechanical properties of PETG aligner material. J Orofac Orthop [Internet]. 2019 Oct 02 [cited 2021 Mar 2]; Available from: J Orofac Orthop
 25. Ryu Jeong-Hyun, Kwon Jae-Sung, Jiang Heng Bo, Cha Jung-Yul, Kim Kwang-Mahn. Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. The Korean journal of Orthodontists [Internet]. 2018 [cited 2021 Mar 2]; Available from: The Korean journal of Orthodontists
 26. Brazel CS, Rosen SL. Fundamental principles of polymeric materials 2010, 3rd ed. London: John Wiley; p. 53.
 27. Kattan M, Dargent E, Ledru J, Grenet J. Strain-induzida cristalização em placas PETG uniaxially desenhada 2001, J Appl Polym Sci 81 (14): 3405–3412.
 28. Daniele Valeria, Macera Ludovico, Taglieri Giuliana, et al. Thermoplastic Disks Used for Commercial Orthodontic Aligners: Complete Physicochemical and Mechanical Characterization. Materials [Internet]. 2020 [cited 2021 Mar 2]; Available from: <https://www.mdpi.com/journal/materials>
 29. Burstone, C.J.; Goldberg, J. Beta Titanium: a new orthodontic alloy. Am J Orthod v .77, n .2, p. 121-32, Feb. 1980

ANEXO 1 – NORMAS DA REVISTA DENTAL PRESS

ORIENTAÇÕES PARA SUBMISSÃO DE MANUSCRITOS

- Submeta os artigos através do site <http://dpjo.dentalpresspub.com/>. Organize sua apresentação como descrito a seguir:

1. Página de título

- deve conter título em português e inglês, resumo e abstract, palavras-chave e keywords.
- coloque todas as informações relativas aos autores em uma página separada, incluindo: nomes completos dos autores, títulos acadêmicos, afiliações institucionais e cargos administrativos. Ainda, deve-se identificar o autor correspondente e incluir seu endereço, números de telefone e e-mail. Essa informação não estará disponível para os revisores.

2. Resumo/Abstract

- os resumos estruturados, em português e inglês, de 250 palavras ou menos são os preferidos.
- os resumos estruturados devem conter as seguintes seções: INTRODUÇÃO, apresentando a proposição do estudo; MÉTODOS, descrevendo como o mesmo foi realizado; RESULTADOS, descrevendo os resultados primários; e CONCLUSÕES, relatando o que os autores concluíram dos resultados, além das implicações clínicas.
- os resumos devem ser acompanhados de 3 a 5 palavras-chave, ou descritores, também em português e em inglês, as quais devem ser adequadas conforme MeSH/DeCS.

3. Texto

- o texto deve ser organizado nas seguintes seções: Introdução, Material e Métodos, Resultados, Discussão, Conclusões, Referências, e Legendas das figuras.
- os textos devem ter o número máximo de 4.000 palavras, incluindo legendas das figuras, resumo, abstract e referências.
- envie figuras e tabelas em arquivos separados (ver abaixo).
- também insira as legendas das figuras no corpo do texto, para orientar a montagem final do artigo.

4. Figuras

- as imagens digitais devem ser no formato JPG ou TIF, em CMYK ou tons de cinza, com pelo menos 7 cm de largura e 300 dpis de resolução.
- as imagens devem ser enviadas em arquivos independentes.
- se uma figura já foi publicada anteriormente, sua legenda deve dar todo o crédito à fonte original.
- confirmar se todas as figuras foram citadas no texto.

5. Gráficos e traçados cefalométricos

- devem ser enviados os arquivos contendo as versões originais dos gráficos e traçados, nos programas que foram utilizados para sua confecção.

6. Tabelas

- as tabelas devem ser autoexplicativas e devem complementar, e não duplicar o texto.
- devem ser numeradas com algarismos arábicos, na ordem em que são mencionadas no texto.
- forneça um breve título para cada uma.
- se uma tabela tiver sido publicada anteriormente, inclua uma nota de rodapé dando crédito à fonte original.
- apresente as tabelas como arquivo de texto (Word ou Excel, por exemplo) e não como elemento gráfico (imagem não editável).

7. Declaração de Cessão de Direitos Autorais

- todos os manuscritos devem ser acompanhados da seguinte declaração escrita, assinada por todos os autores: "O(s) autor(es) abaixo assinado(s) transfere(m) todos os direitos autorais do manuscrito [inserir título do artigo aqui] para a Dental Press International, caso o trabalho seja publicado. O(s) autor(es) abaixo assinado(s) garante(m) que o artigo é original, não infringe qualquer direito autoral ou outro direito de propriedade de terceiros, não está sendo analisado por outra revista e não foi publicado anteriormente, seja em mídia impressa ou eletrônica. Eu (nós) assino (assinamos) e aceito (aceitamos) a responsabilidade de publicar este material."
- digitalize esse termo de liberação de direitos autorais e o envie pelo site*, junto com o artigo.

8. Comitês de Ética

- Os artigos devem, se aplicável, fazer referência a pareceres de Comitês de Ética.

9. Referências

- todos os artigos citados no texto devem constar na lista de referências.
- todas as referências listadas devem ser citadas no texto.
- com o objetivo de facilitar a leitura do texto, as referências serão citadas no texto apenas indicando a sua numeração.
- as referências devem ser identificadas no texto por números arábicos sobrescritos e numeradas na ordem em que são citadas no texto.
- as abreviações dos títulos dos periódicos devem ser normalizadas de acordo com as publicações "Index Medicus" e "Index to Dental Literature".
- a exatidão das referências é de responsabilidade dos autores; as mesmas devem conter todos os dados necessários à sua identificação.
- as referências devem ser apresentadas no final do texto obedecendo às Normas Vancouver (http://www.nlm.nih.gov/bsd/uniform_requirements.html).
- não devem ultrapassar o limite de 30.