

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Odontologia

Ana Luiza Cabral de Ávila Andrade

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FRATURA DE MODELOS ORTODÔNTICOS
DE RESINA FOTOSSENSÍVEL DE 405 nm APÓS OCAGEM: ensaio mecânico**

Belo Horizonte

2022

Ana Luiza Cabral de Ávila Andrade

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FRATURA DE MODELOS ORTODÔNTICOS
DE RESINA FOTOSSENSÍVEL DE 405 nm APÓS OCAGEM: ensaio mecânico**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Odontologia, Área de concentração: Ortodontia

Linha de pesquisa: Novos materiais ortodônticos. Desempenho laboratorial e avaliação clínica.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Quiroga Souki

Belo Horizonte

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

A553a	<p>Andrade, Ana Luiza Cabral de Ávila</p> <p>Avaliação da resistência à fratura de modelos ortodônticos de resina fotossensível de 405 nm após ocagem: ensaio mecânico / Ana Luiza Cabral de Ávila Andrade. Belo Horizonte, 2022.</p> <p>63 f. : il.</p> <p>Orientador: Bernardo Quiroga Souk</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Odontologia</p> <p>1. Modelos dentários. 2. Impressão tridimensional. 3. Teste de materiais (Odontologia). 4. Resinas dentárias. 5. Resistência de materiais. 6. Força compressiva. I. Souk, Bernardo Quiroga. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Odontologia. III. Título.</p> <p>CDU: 616.314-089.23</p>
-------	---

Ana Luiza Cabral de Ávila Andrade

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FRATURA DE MODELOS ORTODÔNTICOS
DE RESINA FOTOSENSÍVEL DE 405 nm APÓS OCAGEM: ensaio mecânico**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Odontologia. Área de Concentração: Ortodontia.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA:

- 1- Prof. Dr. Benedito Viana Freitas – UFMA
- 2- Prof. Dr. Pedro Paiva Brito – PUC Minas
- 3- Prof. Dr. Bernardo Quiroga Souki – PUC Minas

DATA DA APRESENTAÇÃO E DEFESA: 06 de dezembro de 2022

A dissertação, nesta identificada, foi aprovada pela Banca Examinadora

Prof. Dr. Bernardo Quiroga Souki
Orientador

Prof. Dr. Rodrigo Villamarim Soares
**Coordenador do Programa de Pós-graduação
em Odontologia**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida, pela saúde e por sempre colocar pessoas incríveis no meu caminho.

Aos meus pais, Luiz e Vera, agradeço pelo amor, pelo apoio em minhas escolhas e por todos os ensinamentos e oportunidades. Faltam palavras para expressar minha gratidão e descrever a importância de vocês em minha vida. Mãe, você é o meu maior exemplo de bondade e cuidado. Pai, você é o meu exemplo de tranquilidade, sensatez e claro, de profissional. Vocês são meu espelho e minha base.

Aos meus queridos amigos da turma XXI, Amanda Diniz, Fernanda Lavall, Gabriel Azevedo, Patrícia Chaves e Yasmin Dias, obrigada pela união e parceria nos longos 3 anos e meio de curso. Nosso encontro foi uma sorte grande, juntos compartilhamos alegrias e dificuldades, e sem dúvidas a caminhada ficou mais leve com vocês do lado. Obrigada pela amizade, pelo companheirismo e convivência diária. Ganhei amigos que vou levar para o resto da vida.

Ao meu orientador Prof. Bernardo Quiroga Souki que é um exímio profissional. Admiro sua sabedoria e organização, e agradeço por toda disponibilidade, dedicação, paciência, generosidade e boa vontade. É uma honra aprender com você e trabalhar nesse projeto ao seu lado, você é um exemplo de Ortodontista que almejo ser.

Agradeço a todos os brilhantes professores do Mestrado Profissional em Ortodontia, Dauro Oliveira, Flávio Almeida, Hélio Brito, Heloísio Leite, Ildeu Andrade, Izabella Lucas e Tarcísio Junqueira. Vocês são exemplos de excelência e foram essenciais na minha formação. Serei sempre grata a vocês.

Ao Luis Felipe, meu amor e parceiro de caminhada, agradeço pelo zelo, pelo apoio e pelo carinho. Agradeço também a sua família por sempre me acolher como filha.

Às minhas amigas da vida, de Barbacena e de Belo Horizonte, por sempre estarem presentes, por torcerem por mim e por serem um porto seguro. Agradeço à toda minha família pelo amor e pelas orações, em especial Vó Marise, Vó Nilda, Ina e Dada.

RESUMO

O potencial terapêutico dos alinhadores plásticos removíveis representou uma mudança transformacional no exercício da Ortodontia e um desafio para o processo educacional da especialidade, considerando que de forma praticamente unânime os profissionais da área são neófitos na técnica. A busca dos pacientes por tratamentos com esse dispositivo é crescente, e impacta a gestão logística e financeira dos consultórios privados. Assim, técnicas alternativas aos alinhadores comerciais terceirizados, como os fabricados *in-office*, têm despertado o interesse profissional. A impressão de modelos digitais 3D com resina fotossensível de 405 nm é um passo ainda essencial da produção dos alinhadores *in-office*. Essa matéria-prima representa uma etapa onerosa do processo, desta maneira busca-se o seu uso racional, com a adoção de estratégias de economia financeira. A ocagem dos modelos, com a redução do volume de resina é uma das manobras adotadas na busca por aumento da eficiência. O presente estudo teve como objetivo avaliar o impacto da ocagem da estrutura dos modelos ortodônticos de resina, bem como do seu envelhecimento de curto prazo, sobre a resistência à fratura. Trinta e cinco corpos de prova de resina fotossensível de 405 nm foram impressos, sendo que três variações de ocagem da estrutura dos modelos (1 mm de parede, 2 mm de parede, 1 mm de parede com *infill* de 30%) foram preparadas com 10 corpos de prova cada, e cinco corpos de prova foram impressos de forma sólida, sem ocagem, servindo como grupo controle. Dos 10 corpos de prova de cada um dos grupos com ocagem, metade foi armazenada em sacos plásticos em temperatura ambiente, por 45 dias antes do ensaio mecânico de resistência à compressão. A outra metade (n=5 em cada um dos três grupos) foi armazenada por 72 horas. Adicionalmente, 40 modelos mandibulares impressos em resina, de paciente em fase de dentadura permanente, foram utilizados no ensaio qualitativo de resistência, realizado com laminados plásticos de PETG de 0,75mm em termoplásticas a vácuo (*Plastivac*) e pressão (*Ministar*), com cargas variadas de 4 bar (0,4 Mpa), 3,5 bar (0,35 Mpa), 3 bar (0,3 Mpa) e 2 bar (0,2 Mpa). Estes modelos seguiram o mesmo padrão de ocagem dos corpos de prova. Após os ensaios de resistência à fratura, utilizando uma máquina de ensaio universal EMIC e as termoplásticas, os resultados mostraram que modelos sólidos e recém impressos tem as mais elevadas resistências à compressão. A ocagem dos modelos reduziu a resistência a fratura (>18 MPa vs. <7 MPa), entretanto a redução adicional

da espessura da parede de 2 mm para 1 mm não modificou a resistência a compressão no ensaio laboratorial (aproximadamente 7 MPa para os dois grupos). Modelos testados 72 horas após a impressão apresentaram resistência mecânica superior aos testados com 45 dias de armazenamento (7 MPa vs. 4 MPa). Concluiu-se que a ocagem dos modelos reduz a resistência a fratura. entretanto os valores medidos em modelos ocos são ainda muito elevados e permitiu que a termoplastificação com pressão de 4 bar não fraturasse os modelos mandibulares recém impressos. Se necessário armazenar o modelo por mais tempo, a adição de *infill é recomendada*.

Palavras-chave: Ensaio de materiais. Processo de cura. Impressão 3D. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The admission by Orthodontic professionals of the therapeutic potential of removable plastics aligners represented a transformational change in the practice of the specialty and a challenge for the educational process, considering that orthodontists are practically unanimously new to the technique. The demand from patients seeking treatments with this device is increasing, impacting logistical and financial management. Because of this, alternatives to outsourced third-party aligners, such as that manufactured in-office, have aroused several professionals' interest. 3D printing digital models with 405 nm photosensitive resin are still essential in producing aligners in-office. This raw material represents one of the process's most costly stages; therefore, its rational use is suggested with adopting financial savings strategies. Hollowing out the models with a reduction in the volume of resin is one of the maneuvers adopted in the search for increased efficiency. The present study aimed to evaluate the impact of structural hollowing of resin orthodontic models and their short-term aging on fracture resistance. Thirty-five 405 nm photosensitive resin specimens were printed, and three variations of hollowing the structure models (1 mm wall thickness, 2 mm wall thickness, 1 mm wall thickness with 30% filling) were prepared. Ten specimens each and five specimens were printed solidly, without hollowing, serving as a control group. Half of the ten specimens from each of the three groups with hollowing were accommodated in plastic bags at room temperature for 45 days before the mechanical strength test. The other half (n=5 in each of the three groups) was maintained for 72 hours before testing. Additionally, 40 mandibular models of patients in the permanent dentition were printed for the qualitative phase in a vacuum (Plastivac) and pressure thermoforming machines (Ministar) with loads of 4 bar, 3.5 bar, 3 bar, and 2 bar. These models followed the same hollowing pattern as the specimens. After the fracture resistance tests using an EMIC universal testing machine, Plastivac, and Ministar machines, the results showed that solid and freshly printed models have the highest compressive strengths. Hollowing the models reduced the resistance to fracture (>18MPa vs. <7MPa), however, the additional reduction of the wall thickness from 2 mm to 1 mm did not change the compressive strength in the mechanical laboratory test (approximately 7 MPa for the groups). Models tested 72 hours after printing showed superior mechanical resistance to those tested 45 days of storage (7MPa vs. 4MPa). In conclusion, hollowing out the models reduces the

resistance to fracture. However, the values measured in hollow models are still very high and allow thermoplastification with a 4 bar of pressure, and not fracturing the newly printed mandibular models. Moreover, adding infill is recommended if it is necessary to store the model for longer.

Keywords: Materials testing. Curing process. 3D printing. Mechanical properties.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
DIY	<i>Do It Yourself</i>
MSLA	Estereolitografía de máscara
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
SLA	Estereolitografía a laser
STL	<i>Standard Triangulation Language</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS.....	23
2.1 Objetivo geral	23
2.2 Objetivos específicos.....	23
3 ARTIGO CIENTÍFICO	25
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS.....	49
ANEXO A - Corpos de prova novos e sólidos	51
ANEXO B - Corpo de prova novo com 2 mm sem infill.....	53
ANEXO C - Corpos de prova novos com 1 mm sem infill.....	55
ANEXO D - Corpos de prova novo com 1 mm e infill.....	57
ANEXO E – Corpos de prova envelhecidos com 2 mm sem infill	59
ANEXO F – Corpos de prova envelhecidos com 1 mm sem infill	61
ANEXO G – Corpos de prova envelhecidos com 1 mm e infill.....	63

1 INTRODUÇÃO

Diante do surgimento da técnica de escaneamento intraoral e da modernização digital dos consultórios odontológicos, os tratamentos dentários têm passado por uma revolução, e a Ortodontia é uma das áreas em que essa tecnologia foi absorvida nos últimos anos. O aumento da popularidade do escaneamento intraoral tem forte associação com a aceitação pela comunidade ortodôntica do potencial emprego dos alinhadores plásticos removíveis, o que representou uma mudança transformacional sobre o pensamento convencional de como os especialistas movem terapêuticamente os dentes. Todavia, os novos custos muito elevados com a contratação de pacotes comerciais ofertados pelos fabricantes de alinhadores terceirizados, levaram profissionais a buscar técnicas alternativas de fabricação de seus alinhadores, com a técnica conhecida como *in-office*, ou mesmo *in-house* ou *do-it-yourself* (DIY).

O fluxo de fabricação dos alinhadores *in-office* inicia-se com o registro dos dentes e da oclusão através do escaneamento intraoral. Este processo fornece os arquivos em formato STL (*Standard Triangulation Language*), uma malha digital de pontos triangulados (CUNHA; BARBOSA; PALMA, 2021). Os modelos ortodônticos virtuais são então cuidadosamente modificados através de *software* odontológico especializado que permite, por meio de algoritmos computacionais, o controle dos movimentos dentários planejados em incrementos específicos. Obtém-se, assim, uma série de novos modelos tridimensionais (*sub-setups*) de forma que cada *sub-setup* incorpora as pequenas mudanças posicionais dos dentes.

Todos os modelos de *sub-setups* são assim impressos em resina 3D fotossensível de 405 nm e utilizados como a matriz física para a fabricação dos alinhadores, através de termoplastificação de laminados plásticos sob vácuo ou pressão. As resinas comerciais comumente usadas para impressão apresentam fórmulas próprias, compostas por oligômeros, monômeros, foto-iniciadores, plastificantes, cargas de reforço e pigmentos (RICCIO *et al.*, 2021).

Após a impressão, existem duas importantes etapas: 1) lavar e 2) curar (fotopolimerizar) os modelos impressos. A lavagem em álcool isopropílico ou solventes alternativos é necessária para remover resíduos de resina não curada na superfície (TANEVA; UZONOV, 2020). A exposição complementar à luz UV estimula a formação de ligações químicas adicionais e ajuda a resina a obter mais estabilidade

e resistência mecânica (RICCIO *et al.*, 2021). Como alguns dos componentes da resina funcionam como solvente do próprio material solidificado durante a impressão, faz-se essencial a remoção completa de resíduos da superfície por meio de lavagem, e da fotopolimerização complementar para endurecimento de partes internas não completamente curadas durante a impressão. A permanência de resíduos de resina não curada pode comprometer a resistência à fratura final dos modelos, especialmente se o armazenamento dos modelos for feito para a posterior plastificação, o que pode acontecer dentro de um fluxo normal de gestão dos modelos impressos.

Como a impressão de modelos de resina representa uma das etapas mais onerosas do processo de fabricação de alinhadores *in-office*, a viabilização da técnica, através da economia do volume de resina, é uma ação desejada, mas infelizmente pouco estudada sob a ótica científica. A redução do volume de resina pela ocagem dos modelos é uma das manobras utilizadas clinicamente para reduzir custos, mas tal alteração estrutural pode afetar a resistência mecânica dos modelos pelo afinamento da espessura das paredes, aumentando a chance de fratura durante a termoplastificação dos alinhadores. A inserção de preenchimentos parciais de suporte interno, chamados de *infill* podem aumentar a resistência estrutural dos modelos ocados, e por isto são frequentemente adicionados aos modelos virtuais a serem impressos.

Os modelos ortodônticos impressos em resina que servem como matriz física para a confecção dos alinhadores *in-office*, são submetidos a carga mecânica do laminado plástico previamente aquecido e submetido a pressão ou vácuo, a depender do equipamento a ser utilizado na fabricação. As termoplastificadoras que utilizam pressão, podem ter ou não controle eletrônico da carga a ser utilizada, mas a pressão varia de 2 a 4 bar. Por outro lado, as plastificadoras a vácuo são controladas manualmente pelo operador, com carga bem reduzida, não ultrapassando 1 bar.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo primário testar a hipótese nula que a ocagem dos modelos ortodônticos de resina fotossensível de 405 nm, com a redução da espessura da parede, não interfere com a resistência a fratura dos mesmos. Além disso, objetiva-se secundariamente testar a hipótese nula que o envelhecimento de curto prazo (45 dias) dos modelos não tem associação com a resistência a fratura, considerando que resíduos de resina não curados na estrutura interna podem influenciar a resistência mecânica pelo envelhecimento, mesmo em

curto prazo. Ensaio laboratorial mecânico de resistência à compressão será o defecho primário a ser analisado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto mecânico da ocagem e do processo de envelhecimento de modelos ortodônticos impressos com resina fotossensível de 405 nm na resistência à fratura dos mesmos.

2.2 Objetivos específicos

Após ensaios laboratoriais de compressão, objetiva-se especificamente:

- a) avaliar a **resistência à fratura** de corpo de prova confeccionado com resina fotossensível de 405 nm com parede de **2 mm sem infill**;
- b) avaliar a **resistência à fratura** de corpo de prova confeccionado com resina fotossensível de 405 nm com parede de **1 mm sem infill**;
- c) avaliar a **resistência à fratura** de corpo de prova confeccionado com resina fotossensível de 405 nm com parede de **1 mm com infill** confeccionado com resina fotossensível de 405 nm;
- d) avaliar a **resistência à fratura** de corpo de prova **sólido** confeccionado com resina fotossensível de 405 nm;
- e) estudar os **efeitos do envelhecimento** dos corpos de prova na resistência à fratura e flexibilidade dos corpos de prova;
- f) analisar qualitativamente a resistência à fratura de modelos ortodônticos ocados nas três diferentes configurações após a **termoplastificação** pela **técnica de pressão com 4 bar**;
- g) analisar qualitativamente a resistência à fratura de modelos ortodônticos ocados nas três diferentes configurações após a **termoplastificação** pela **técnica de pressão com 3,5 bar**;
- h) analisar qualitativamente a resistência à fratura de modelos ortodônticos ocados nas três diferentes configurações após a **termoplastificação** pela **técnica de pressão com 3 bar**;

- i) Analisar qualitativamente a resistência à fratura de modelos ortodônticos ocados nas três diferentes configurações após a **termoplastificação** pela **técnica de pressão com 2 bar**;
- j) Analisar qualitativamente a resistência à fratura de modelos ortodônticos ocados nas três diferentes configurações após a **termoplastificação** pela **técnica de vácuo**.

3 ARTIGO CIENTÍFICO

Modelos ortodônticos de resina fotossensível de 405 nm após ocagem: a redução da resistência a fratura afeta o seu desempenho na fabricação de alinhadores *in-office*?

Esse artigo será submetido para publicação no periódico **Dental Materials (ISSN 0109-5641) (Qualis A1)**.

A formatação foi feita respeitando as normas para submissão de artigos nesse periódico que podem ser encontradas no endereço eletrônico: <https://www.sciencedirect.com/journal/dental-materials>

Modelos ortodônticos de resina fotossensível de 405 nm após ocagem: a redução da resistência a fratura afeta o seu desempenho na fabricação de alinhadores *in-office*?

Ana Luiza Cabral de Ávila Andrade^a; Pedro Paiva Brito^b; Carlos Trivellato de Carvalho Filho^b; Raiane Machado Maia^a; Bernardo Quiroga Souki^a

^a Programa de pós-graduação em Ortodontia, Departamento de Odontologia, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

^b Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Correspondência para: Dr. Bernardo Quiroga Souki, Programa de Pós-graduação em Odontologia, PUC Minas, Av. Dom Jose Gaspar, 500, Prédio 46, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, CEP: 30535-901

Telefone: +55 31 3319-4414

e-mail: bqsouki@gmail.com

Resumo

Introdução: A impressão de modelos é um passo essencial da produção dos alinhadores *in-office*. A resina representa uma etapa onerosa do processo, logo, busca-se estratégias de economia. Ocar os modelos, reduzindo o volume de resina é uma manobra adotada. **Objetivo:** Avaliar o impacto da ocagem e do envelhecimento de curto prazo dos modelos sobre a resistência à fratura. **Métodos:** 35 corpos de prova de resina fotossensível de 405 nm foram impressos, com variações de ocagem (1 mm de parede, 2 mm de parede, 1 mm de parede com *infill*). Cinco corpos sólidos foram usados como grupo controle. De cada grupo ocado, metade foi armazenada por 45 dias antes do ensaio e a outra metade por 72 horas. Adicionalmente, 40 modelos mandibulares foram utilizados no ensaio qualitativo, com laminados plásticos PETG de 0,75mm em termoplasticadoras a vácuo e pressão, com cargas variadas de 4 a 2 bar. Estes seguiram o mesmo padrão de ocagem dos corpos de prova. Os ensaios de resistência foram realizados por máquina de ensaio EMIC e termoplastificadoras. **Resultados:** Modelos sólidos recém impressos tem as mais elevadas resistências à compressão. A ocagem reduziu a resistência a fratura, mas reduzir a parede de 2 para 1 mm não modificou a resistência. Modelos testados 72 horas pós impressão apresentaram resistência superior aos armazenados 45 dias. **Conclusões:** A ocagem reduz a resistência. Entretanto, os valores medidos são elevados, permitindo que a termoplastificação com 4 bar não fraturasse modelos recém impressos. Se necessário armazenar o modelo por mais tempo, recomenda-se adicionar infill.

Palavras-chave: Ensaio de materiais. Processo de cura. Impressão 3D. Propriedades mecânicas.

1 Introdução

O aumento no uso dos alinhadores plásticos removíveis na última década representou uma mudança transformacional sobre o pensamento convencional de como os especialistas movem terapêuticamente os dentes. Todavia, esta nova realidade trouxe aos ortodontistas um desafio na gestão financeira de seus consultórios privados, diante da necessidade de contratação de pacotes comerciais dos fabricantes de alinhadores terceirizados. Isto levou ao desenvolvimento de técnicas alternativas de fabricação própria de alinhadores, chamados de *in-office*, *in-house* ou de sistema *do-it-yourself* (DIY).

Para a confecção dos alinhadores propriamente ditos, utiliza-se um laminado plástico termoplastificado sob pressão ou vácuo sobre uma matriz física construída por modelagem aditiva de resina fotossensível de 405 nm. As resinas comerciais comumente usadas para impressão 3D apresentam fórmulas próprias, compostas por oligômeros, monômeros, foto-iniciadores, plastificantes, cargas de reforço e pigmentos [1]. Após a impressão, existem duas importantes etapas: 1) lavar e 2) curar (fotopolimerizar) os modelos impressos. A lavagem em álcool isopropílico ou solventes alternativos remove resíduos de resina não curada na superfície [2]. A exposição complementar à luz UV estimula a formação de ligações químicas adicionais e ajuda a resina a obter mais estabilidade e resistência mecânica [1].

Como a impressão de modelos de resina representa uma das etapas mais onerosas do processo de fabricação de alinhadores *in-office*, a viabilização da técnica, através da economia do volume de resina, é uma ação desejada, mas infelizmente pouco estudada sob a ótica científica. A redução do volume de resina pela ocagem dos modelos é uma das manobras utilizadas clinicamente para reduzir custos, mas tal alteração estrutural pode afetar a resistência mecânica dos modelos pelo afinamento da espessura das paredes, aumentando assim, a chance de fratura durante a termoplastificação dos alinhadores. A inserção de preenchimentos parciais de suporte interno, chamados de *infill* podem aumentar a resistência estrutural dos modelos ocados, e por isto são frequentemente adicionados aos modelos virtuais a serem impressos.

Os modelos ortodônticos impressos em resina são submetidos a carga mecânica do laminado plástico previamente aquecido e submetido a pressão ou vácuo, a depender do equipamento a ser utilizado na fabricação do alinhador

propriamente dito. As termoplastificadoras que utilizam pressão, tem controle eletrônico da carga a ser utilizada, variando de 2 a 4 bar. Por outro lado, as plastificadoras a vácuo são controladas manualmente pelo operador, com carga bem reduzida, não ultrapassando 1 bar.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo primário testar a hipótese nula que a ocação dos modelos ortodônticos de resina fotossensível de 405 nm, com a redução da espessura da parede, não interfere com a resistência a fratura dos mesmos. Além disso, objetiva-se secundariamente testar a hipótese nula que o envelhecimento de curto prazo (45 dias) dos modelos não tem associação com a resistência a fratura, considerando que resíduos de resina não curados na estrutura interna podem influenciar a resistência mecânica pelo envelhecimento, mesmo em curto prazo. Ensaio mecânico de resistência à compressão será o desfecho primário a ser analisado.

2 Materiais e Métodos

2.1 Preparo dos corpos de prova

Trata-se de um estudo experimental laboratorial, explicativo/analítico. Trinta e cinco corpos de prova (Fig. 1A) foram gerados a partir de um arquivo com extensão STL do segmento dentário maxilar oriundo de modelo digital selecionado aleatoriamente de banco de dados de pacientes da PUC Minas. Os corpos de prova apresentavam as seguintes dimensões: 22,23 mm de largura, 15,25 mm de altura e área de apoio de 174,37 mm². Essas medidas foram usadas para cálculo da área instantânea (área do modelo onde a carga é aplicada) durante a análise dos dados. Edições e recortes foram feitos utilizando o *software* 3D *MeshMixer* (Autodesk Inc. San Rafael, California, EUA). No programa *Chitubox* (Shenzhen, Guangdong, China) os corpos de prova foram ocados em três configurações (parede de 2 mm sem *infill*; parede de 1 mm sem *infill*; parede de 1 mm com *infill* de 30%). Para permitir a lavagem interna dos corpos de prova ocados, foram criados orifícios padronizados de formato circular, com diâmetro de 3,5 mm e profundidade de 3 mm (Fig. 1B).

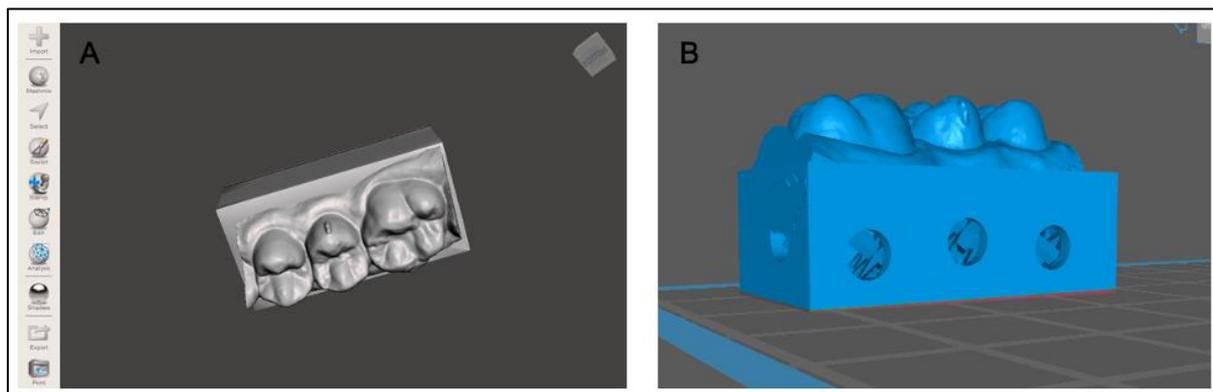


Figura 1 – Corpo de prova (A: Sólido no programa *Meshmixer*, B: Ocado e perfurado no programa *Chitubox*)

Os corpos de prova com ocagem nas três configurações foram replicados e alocados em seis grupos experimentais e um grupo controle, conforme descrição da Tabela 1; como recomendado pela norma internacional ASTM (2014).

Grupo 1	Corpo de prova novo e sólido (n=5)
Grupo 2	Corpo de prova novo com 2mm de parede sem <i>infill</i> (n=5)
Grupo 3	Corpo de prova novo com 1mm de parede sem <i>infill</i> (n=5)
Grupo 4	Corpo de prova novo com 1mm de parede com <i>infill</i> (n=5)
Grupo 5	Corpo de prova envelhecido com 2mm de parede sem <i>infill</i> (n=5)
Grupo 6	Corpo de prova envelhecido com 1mm de parede sem <i>infill</i> (n=5)
Grupo 7	Corpo de prova envelhecido com 1mm de parede com <i>infill</i> (n=5)

Tabela 1 – Descrição dos grupos

Os Grupos 1, 2, 3 e 4 (Fig. 2), correspondentes aos corpos de prova recém impressos, foram levados ao ensaio de compressão 72 horas após a impressão. Já os Grupos 5, 6 e 7, correspondentes aos corpos de prova envelhecidos, foram armazenados em sacos plásticos em temperatura ambiente por 45 dias antes do ensaio mecânico de resistência à compressão.

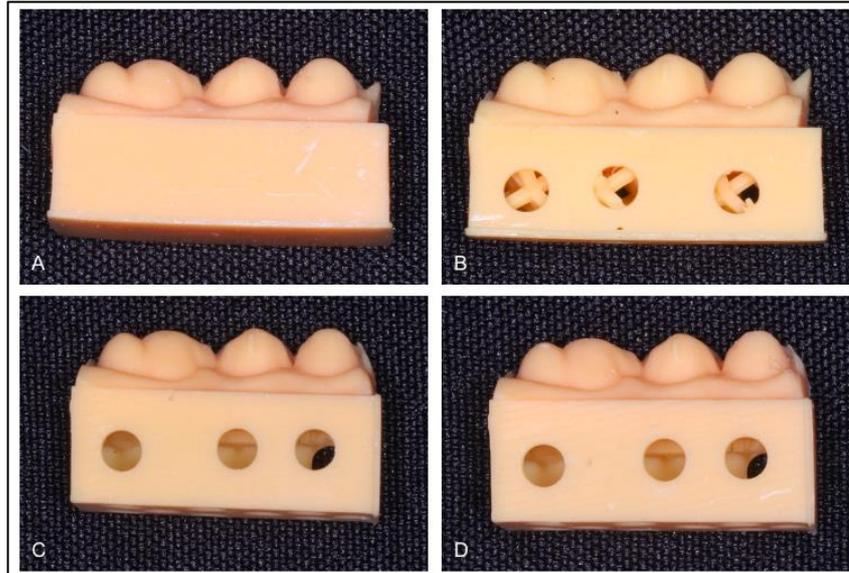


Figura 2 – Corpos de prova (A: sólido, B: parede de 1 mm com *infill*, C: parede de 2 mm sem *infill*, D: parede de 1 mm sem *infill*)

Para a execução da fase qualitativa do estudo, utilizou-se as plastificadoras a vácuo *Plastivac P7* (Bioart, São Carlos, Brasil) e de pressão *Ministar* (Scheu, Iserlohn, Alemanha). Para tanto, um total de 40 modelos mandibulares de resina fotossensível de 405 nm de um paciente em fase de dentadura permanente com 28 dentes foram impressos. Foram alocados cinco modelos para cada um dos quatro grupos de ocagem (sólido, 2 mm de parede, 1 mm de parede, 1 mm de parede com *infill* hexagonal), para cada uma das duas plastificadoras. Os modelos foram exportados pelo software *ArchForm* (<https://www.archform.com>), já com as ocagens efetuadas virtualmente, como ilustrado na Fig. 3. Utilizou-se os mesmos parâmetros de impressão descritos anteriormente.

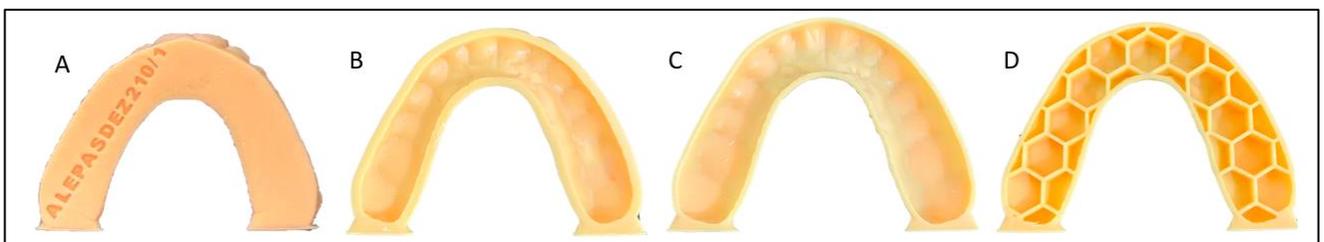


Figura 3 – Modelos ortodônticos para o ensaio utilizando as termoplastificadoras (A: sólido, B: parede de 2 mm sem *infill*, C: parede de 1 mm sem *infill*, D: parede de 1 mm com *infill*)

2.2 Impressão 3D

As amostras foram impressas em resina fotossensível de 405 nm com a impressora *Elegoo Saturn*, baseada na tecnologia de estereolitografia de máscara (MSLA). Tal impressora se encontrava em estado de fábrica, sem uso prévio, e portanto, com a fonte de luz e o LCD com vida útil integral. A impressão foi configurada no programa Chitobox 1.8 utilizando-se 5 camadas de base, com 30 segundos cada, e camadas subsequentes de 2 segundos. O tempo de retardo da luz UV foi de 7 segundos e a velocidade da plataforma foi de 210 mm/min. A altura das camadas foi de 0,05 mm. Utilizou-se resina da marca *3D Cure Standard* (*3D Cure*, Belo Horizonte, Brasil), na cor salmão.

2.3 Processamento pós impressão 3D

A lavagem dos modelos foi feita com agitação manual por 30 segundos em dois tanques consecutivos de álcool etílico hidratado (etanol), seguido por um banho complementar em álcool isopropílico. Banhos consecutivos em tanques de água em temperatura ambiente para a completa remoção de resíduos de resina e álcoois também com agitação manual, foram realizados pelo mesmo técnico operador. Após a secagem inicial superficial por duas horas, os modelos receberam pós cura em câmara de luz UV, com potência de 9 W por 5 minutos, e depois foram deixados secando em temperatura ambiente, em sacos plásticos transparentes, por dois períodos distintos (72 horas ou 45 dias).

2.4 Preparo da amostra

Para a realização dos ensaios de compressão, a aplicação da força sobre a superfície do modelo pela máquina de ensaio universal deve ser uniforme e simétrica. Diante de uma superfície dentária irregular, devido às cúspides e fossas dentárias, foi desenvolvida para esta investigação uma peça metálica fundida em liga de níquel-cromo, correspondente ao negativo do corpo de prova (Fig. 4). A base do corpo de prova e a base do dispositivo metálico confeccionado para o presente estudo eram paralelos, permitindo o apoio uniforme das plataformas da máquina durante o ensaio de compressão.

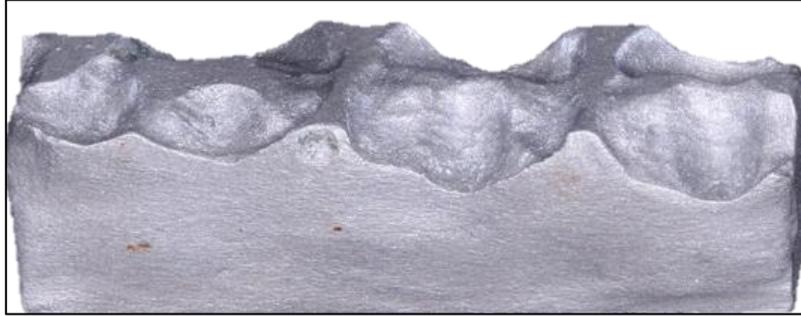


Figura 4 – Peça metálica correspondente ao negativo do corpo de prova

2.5 Análise quantitativa de propriedades mecânicas

O ensaio mecânico de compressão foi executado com equipamento da marca EMIC®, modelo DL 500, com limite de carga de 5kN (ou 509,58 kg), disponível no laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (Fig. 5).

A metodologia para o ensaio de compressão foi baseada na norma ASTM D695-15 *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastic*.



Figura 5 – Máquina de ensaio universal

A máquina de ensaio de compressão atua em conjunto com o *software* de ensaios TESC-EMIC instalado no computador. O TESC é um programa de automação de ensaios que acompanha a máquina EMIC e arquiva os resultados do teste em forma de gráficos e valores numéricos.

Os corpos de prova foram posicionados sobre o negativo, entre os pratos de compressão da máquina e assim o ensaio era iniciado, até completa fratura ou deformação do corpo de prova (Fig. 6).

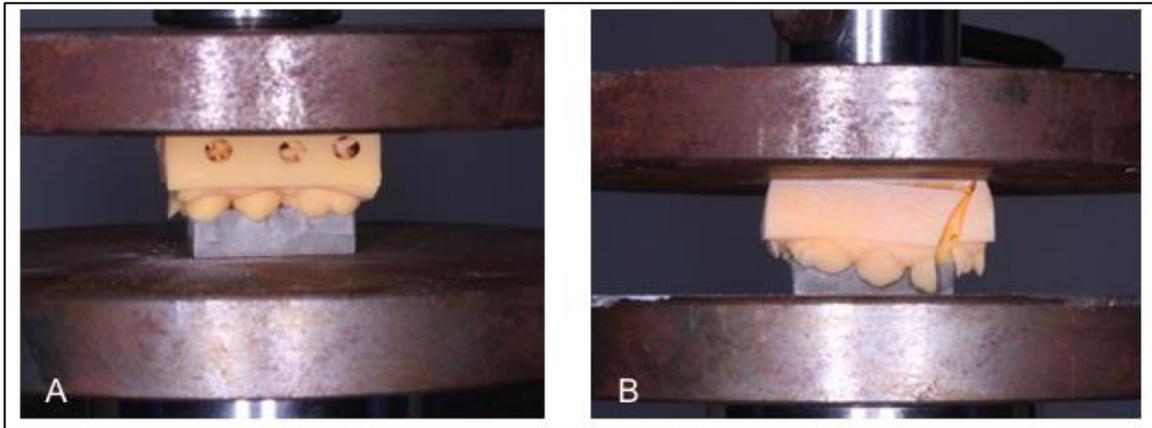


Figura 6 – Ensaio mecânico de compressão (A: Corpo de prova com parede de 1 mm e *infill* sem fratura visível, porém com deformação elástica estrutural, B: Corpo de prova sólido fraturado)

2.6 Análise qualitativa de propriedades mecânicas

Após 72 horas da impressão, os modelos completos que receberam o mesmo tratamento de pós cura descritos pelos corpos de prova da fase quantitativa, foram submetidos a carga mecânica usualmente empregada na fabricação dos alinhadores, com a termoplastificação de laminados de PETG com espessura de 0,75 mm sob pressão. Utilizou-se termoplastificadoras de pressão da marca *Scheu*, modelo *Ministar*, e de mecanismo a vácuo da marca *Bioart*, modelo P7. A plastificadora *Ministar* permitiu o controle digital de diversas pressões, para cada grupo da pesquisa. Testou-se a resistência à fratura com pressão de 4 bar, 3,5 bar, 3 bar e 2 bar. A plastificadora *Plastivac* tem controle totalmente manual, sem controle da força exercida. A inspeção visual dos modelos submetidos ao ensaio permitiu a análise da ocorrência ou não de fratura.

2.7 Análise estatística

Os valores da resistência à compressão, distância de deslocamento da plataforma da máquina de ensaio até a fratura do modelo, e o tempo necessário para

a fratura ou deformação dos modelos foram inicialmente submetidos ao teste de normalidade (*Kolmogorov-Smirnov*), testando a hipótese de normalidade na distribuição dos dados. Um valor P maior ou igual a 0,05 é indicativo de distribuição normal, enquanto valores menores do que 5% indicam que o pressuposto de normalidade não foi atendido. Para as variáveis que apresentaram distribuição normal, foi aplicada a análise de variância de um fator (ANOVA), com pós teste de Dunnett. Nos casos em que a variável não apresentasse distribuição normal, utilizou-se teste de *Kruskal-Wallis*.

3 Resultados

O gráfico 1 mostra o diagrama de tensão (megapascal) por deformação (milímetros) comparativo entre os grupos, de forma que a tensão representa a força dividida pela superfície de contato entre o corpo de prova impresso e a peça metálica correspondente ao negativo. No gráfico, G1 corresponde ao corpo de prova novo e sólido; G2 ao corpo de prova novo com 2 mm de parede sem *infill*; G3 ao corpo de prova novo com 1 mm de parede sem *infill*; G4 ao corpo de prova novo com 1 mm de parede com *infill*; G5 ao corpo de prova envelhecido com 2 mm de parede sem *infill*; G6 ao corpo de prova envelhecido com 1 mm de parede sem *infill* e G7 ao corpo de prova envelhecido com 1 mm de parede com *infill*. Os corpos de prova novos e sem *infill* apresentaram valores de resistência a compressão estatisticamente mais elevados do que os corpos de prova de mesma estrutura, porém envelhecidos.

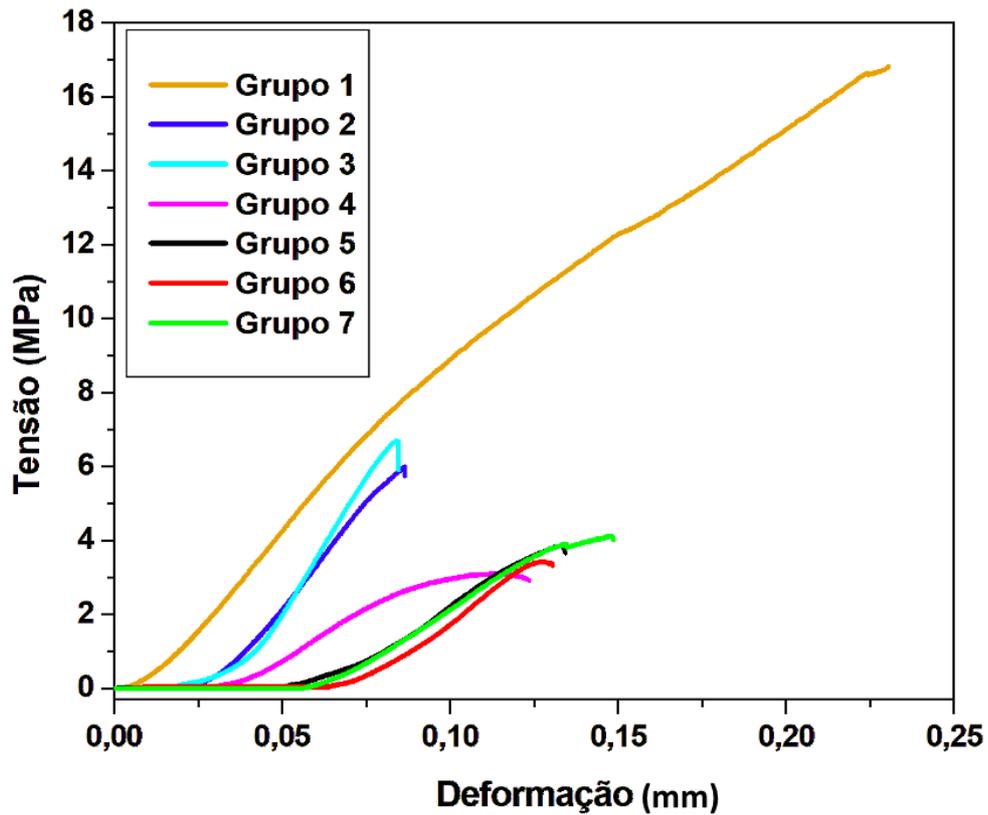
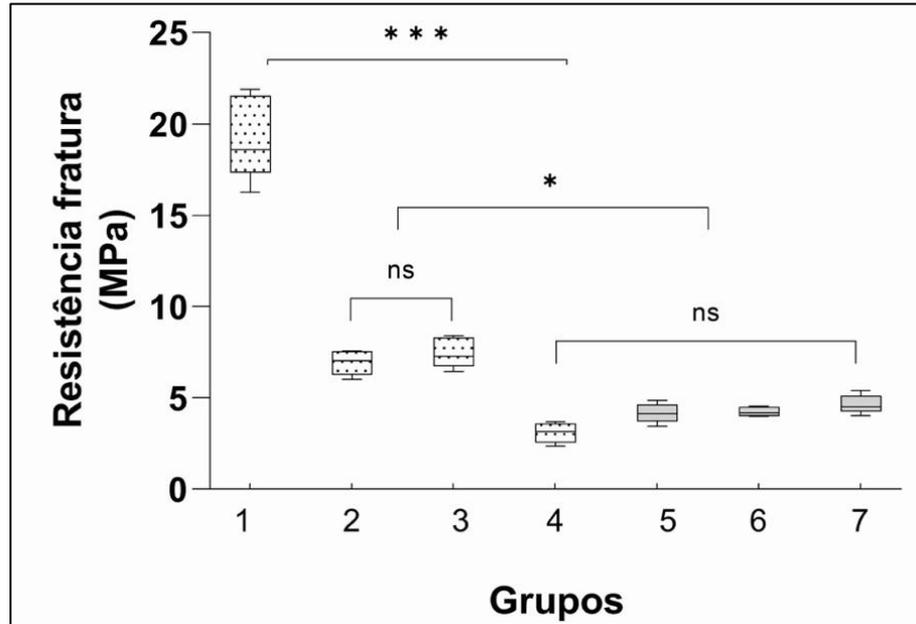


Gráfico 1 – Gráfico comparativo entre os 7 grupos do estudo.

A amostra do presente estudo foi composta por sete grupos de corpos de prova, contando com cinco corpos de prova cada um e totalizando 35 ensaios. Os valores encontrados de resistência à compressão constando de média, desvio-padrão, e mediana são apresentados no Gráfico 2.



Legenda: G1: sólido e novo. G2: novo com 2mm de parede sem *infill*. G3: novo com 1mm de parede sem *infill*. G4: novo com 1mm de parede com *infill*. G5: envelhecido com 2mm de parede sem *infill*. G6: envelhecido com 1mm de parede sem *infill*. G7: envelhecido com 1mm de parede com *infill*.

*** $p < 0,001$)

* $p < 0,05$

ns: sem diferença estatística

Gráfico 2 – Resistência à compressão.

O grupo 1 (corpo de prova novo e sólido) funcionou como “padrão ouro”, com resistência máxima e, portanto, significativamente superior a todos os grupos experimentais ocados e envelhecidos do estudo.

Os grupos 2, 3 e 4 são representados pelos corpos de prova com resinas novas (72 horas de armazenamento). Nota-se que os grupos 2 e 3, corpos de prova sem *infill* e com paredes com espessura de 2 mm ou 1 mm respectivamente, não apresentam diferença estatisticamente significativa entre si. Os resultados indicaram que a redução de 2 mm para 1 mm da espessura da parede do corpo de prova não influenciou a resistência à compressão. No entanto, no grupo 4, representado pelos corpos de prova novos com parede de 1 mm e reforçados com *infill* de 30%, observou-se uma redução da resistência medida pela máquina à fratura. Tal fato se dá pela fragilidade dos finos suportes do *infill* que são fraturados internamente e consequentemente levam à fratura da estrutura da parede externa.

Nos grupos 5, 6 e 7, cujos corpos de prova estavam envelhecidos por 45 dias, a resistência à compressão foi semelhante entre os três grupos e sem diferença

estatisticamente significativa entre eles, todavia com valores significativamente mais reduzidos do que nos grupos 2 e 3.

Com relação aos grupos com estrutura semelhante, mas com diferença no envelhecimento da resina (G2 vs. G5 e G3 vs. G6), os resultados mostraram diferenças estatisticamente significativas. Entre os grupos que possuem *infill* (G4 e G7), o envelhecimento da resina não comprometeu a resistência à compressão de forma significativa. A resistência foi maior mesmo após o envelhecimento da resina, pelo aumento da flexibilidade, mas sem diferença estatisticamente significativa.

Ao comparar todos os grupos com o grupo controle (G1), pode-se perceber que o ar o modelo reduz drasticamente a resistência compressiva dos corpos de prova.

No ensaio qualitativo, nenhum dos modelos impressos nas quatro configurações de ocagem ou sólido, sofreu fratura nas plastificadoras a vácuo ou pressão. Nas pressões controladas de 4 bar, 3,5 bar, 3 bar e 2 bar, oferecidas pela *Ministar*, não foi observado qualquer sinal de fratura dos modelos. O mesmo com a plastificação manualmente controlada sob vácuo.

4 Discussão

O presente estudo demonstrou que é possível economizar resina por meio da ocagem dos modelos impressos utilizados na fabricação dos alinhadores *in-office*. Mesmo com a redução drástica da resistência à compressão diante da técnica de ocagem dos modelos, valores muito elevados de resistência foram medidos nos corpos de prova experimentais, trazendo margem de segurança aos profissionais para que a economia possa ser buscada pela redução do volume de resina. Paralelamente, encontrou-se que o modelo armazenado para processamento futuro, em 45 dias, tem a sua resistência à fratura comprometida. Desta maneira, se a decisão do clínico for manter os modelos armazenados para futuro aproveitamento em replicação da fabricação de alinhadores, o ajuste da pressão de termoplastificação precisa ser considerado, apesar dos valores nominais de resistência à compressão mesmo diante do envelhecimento serem superiores aqueles ofertados pelas máquinas termoplastificadoras utilizadas na Ortodontia. No presente estudo não se avaliou o efeito do aquecimento dos modelos sobre a resistência a fratura, o que precisa ser avaliado em estudo futuro.

O corpo de prova sólido representou o padrão-ouro na resistência à fratura comparativamente aos outros grupos. Estudos prévios também mostraram que conforme a espessura do modelo é reduzida, a resistência estrutural também diminui, e com isso aumenta a chance de deformação estrutural e fratura das peças impressas [3].

De acordo com Attaran [4], a grande quantidade da resina utilizada para imprimir um modelo 3D é cara, e por isso esforços têm sido realizados para limitar o dispêndio da resina. Sabe-se que a quantidade do material fotopolimerizável gasto varia conforme a estrutura interna e o volume da peça impressa [5]. Similarmente, Shin *et al.* [3] citaram que a impressão de modelo vazio ou com paredes externas finas reduzem a quantidade gasta de resina. Dependendo da tecnologia da impressora (SLA, por exemplo), essa estratégia pode também reduzir o tempo de impressão [6]. Na presente investigação foi utilizada impressora MSLA, cujo tempo de trabalho não sofre modificação com a ocagem dos modelos.

Segundo Rungrojwittayakul *et al.* [7] modelos com estrutura interna oca são preconizados em laboratórios odontológicos buscando economizar custos e tempo de impressão. Porém, ainda não existem recomendações para a espessura da parede do modelo com interior oco.

A resistência à compressão é uma propriedade importante a se considerar na escolha de um material [8]. O resultado do ensaio empregado neste estudo é contrário ao relatado por Watters e Bemhardt [9] que mostraram que o envelhecimento da resina não teve impacto na resistência mecânica das amostras previamente submetidas à cura térmica e à luz UV.

Já que a fabricação de objetos 3D impressos ocorre por camadas, Pant *et al.* [10] demonstraram em 2020 que as peças tendem a ser anisotrópicas, ou seja, apresentar propriedades com valores diferentes, de forma que a divisa entre as camadas represente regiões fracas sob tensões máximas, e tal fato implica no aparecimento de regiões de maior fragilidade dos modelos em sofrer deformações ao serem submetidas a cargas diversas. Como quantidades consideráveis de iniciador residual da resina podem permanecer, mesmo após a lavagem, as peças impressas devem ser pós curadas em câmara ultravioleta para concluir o processo. A exposição à luz UV promove a formação de ligações químicas adicionais, aumentando a rigidez e a força do material [2]. Dados da literatura mostram que o aumento do grau de polimerização que acontece no pós-cura aumenta a união das cadeias poliméricas,

reduzindo o deslizamento das camadas quando o material é submetido à tensão [1]. Os corpos de prova do presente estudo passaram por processamento pós cura após a impressão, através de lavagem em álcool etílico e na sequência em álcool isopropílico. Posteriormente, sofreram pós polimerização UV por 5 minutos.

As impressões do corrente estudo foram produzidas com tecnologia de Estereolitografia de Máscara (MSLA). Em 2022, Staffová *et al.* [11] afirmaram que os produtos impressos por MSLA são fortemente determinados pelos parâmetros de processamento e de pós processamento. A literatura prévia indica que métodos de cura pós impressão são sobretudo favoráveis para melhorar as propriedades mecânicas de amostras de modelos de resina fotossensível de 405 nm [12]. Não foi testado neste ensaio o impacto do aumento ou da redução do tempo de pós-cura na resistência mecânica dos corpos de prova dentários, sendo que tal investigação se faz necessária, uma vez que o consumo de luz UV implica em custos operacionais. Segundo Mendes *et al.* [13] as propriedades mecânicas do material sofrem grande influência do nível de cura e, dependem do método de pós-cura utilizado, sem luz ou com luz UV.

Sabe-se que o tratamento de lavagem com etanol é o mais comumente utilizado, pela competência de retirar o excesso de resina no pós-processamento. Porém, ainda existe uma lacuna no campo de pesquisa sobre os efeitos que o tratamento de lavagem pós cura apresenta nas propriedades mecânicas de polímeros impressos tridimensionalmente [14]. Staffová *et al.* em estudo de 2022 [11] explicaram que existem regiões mais profundas nas estruturas impressas que não são totalmente curadas em virtude da irradiação comprometida, além do ponto de vitrificação.

No estudo de Elia Marin *et al.* [15] realizado em 2021, amostras de resina metacrilada foram curadas por luz ultravioleta e envelhecidas de forma artificial através de um ciclo de etapas de alta/baixa temperatura. Concluiu-se que o envelhecimento afetou a resistência final de todas as amostras, sendo que a pós cura UV reduziu a perda. Além disso, o envelhecimento artificial e a cura em altas temperaturas induziram oxidação e fragilidade. A resina metacrilada pura, não pós-curada, perde cerca de 70% da carga final após cerca de 2 semanas e após 4 semanas de envelhecimento apresenta uma resistência mecânica que é cerca de 60% menor do que as amostras pós-curadas. Os dados desse trabalho de 2021 são concordantes com resultados encontrados no presente estudo.

Em outro estudo recente, que avaliou o efeito do tempo de exposição à luz na pós polimerização de modelos 3D impressos com resina nas propriedades mecânicas do material de base de prótese, demonstrou-se que amostras envelhecidas têm a resistência à flexão aumentada [16]. No presente estudo não foi testada a resistência a flexão, mas observou-se que os corpos de prova envelhecidos 45 dias aparentavam maior tempo de ensaio até ocorrer a fratura dos modelos, bem como um maior deslocamento linear da plataforma, sugerindo um aumento da flexibilidade dos corpos de prova com o envelhecimento pela ação degradante dos resíduos de solvente no interior do corpo de prova. Assim, os resultados do ensaio presente são coincidentes com tal relato de Aati *et al.* [16]

No estudo de Shin *et al.* [5] os autores concluíram que o aumento da espessura do modelo a ser impresso estabiliza o próprio modelo, que é programado para suportar a deformação durante a retração pós cura de cada camada que está sendo impressa. Sugerem que modelos com paredes muito finas podem sofrer deformação morfológica pela contração não suportada por estrutura do próprio modelo. Rungrojwittayakul *et al.* [7] concluíram que paredes externas de modelos impressos 3D com espessura mais fina apresentam estabilidade menor. Shin *et al.* [5] propuseram que a conduta mais acessível seria diminuir o gasto da resina produzindo modelo oco em forma de U com espessura de parede de 1,5mm, representando uma economia de aproximadamente 40% de material.

O presente estudo, laboratorial, tem a limitação de testar apenas duas variáveis, de uma lista enorme de condições que podem afetar a construção de modelos impressos com resina fotossensível de 405 nm. Não foram testadas a confiabilidade morfológica dos modelos com espessuras variadas de paredes, bem como da variação de resinas de diversos fabricantes, incluindo as novas resinas ecológicas a base de plantas. Tais estudos são necessários e devem contribuir com a prática da Ortodontia dos dias de hoje.

5 Conclusões

Dentro das limitações do estudo, após os ensaios quantitativos e qualitativos com modelos impressos com resina fotossensível de 405 nm é lícito concluir que:

- a estrutura 3D impressa nova e sólida funciona como padrão ouro, com resistência máxima quando comparado com todos os grupos experimentais. Conclui-se que o modelo impresso definitivamente reduz a resistência compressiva;
- a redução da espessura de parede de 2 mm para 1 mm não influenciou a resistência à compressão dos corpos de prova ocos;
- o corpo de prova novo com *infill* apresentou redução significativa da resistência quando comparado aos grupos novos e sem *infill*;
- os três grupos de corpos de prova envelhecidos (2 mm sem *infill*, 1 mm sem *infill* e 1 mm com *infill*) não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si em relação à resistência à compressão;
- comparando estruturas semelhantes, mas tempos de envelhecimento diferentes, os corpos de prova novos sem *infill* apresentaram resistência superior quando comparados aos corpos de mesma estrutura e envelhecidos;
- corpos de prova envelhecidos apresentam menor resistência à compressão e maior deformação estrutural, provavelmente devido à degradação da resina usada na impressão remanescente no interior da estrutura;
- quanto aos grupos com *infill*, a resistência à compressão foi maior no grupo com resina envelhecida devido ao aumento da flexibilidade, mas sem diferença estatisticamente significativa;
- a adição de *infill* no modelo impresso confere maior flexibilidade, porém diminui a resistência compressiva, já que quando a estrutura interna se rompe, rompe também a estrutura externa da parede;
- em situações onde seja necessário armazenar o modelo ortodôntico impresso por mais tempo, sugere-se adicionar *infill* pois ele permite que o modelo se torne mais elástico;
- a maior força exercida sobre o modelo impresso durante termoplastificação é de 4 bar ou 0,4 MPa. Mesmo com resina envelhecida e espessura fina de parede, grupo que apresentou menor resistência, ainda foi possível ter valores seguros de 4 MPa. Assim, todos os grupos do estudo apresentaram resistência à compressão superior à força máxima de compressão aplicada durante a termoplastificação sob pressão.

Referências

- [1] C. Riccio *et al.*, “Effects of Curing on Photosensitive Resins in SLA Additive Manufacturing,” *Applied Mechanics*, vol. 2, no. 4, pp. 942–955, Nov. 2021, doi: 10.3390/applmech2040055.
- [2] I. Taneva and T. Uzunov, “Influence of post-polymerization processing on the mechanical characteristics of 3D-printed occlusal splints,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Jun. 2020, vol. 1492, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1492/1/012018.
- [3] S. H. Shin, J. S. Kwon, J. S. Shim, and J. E. Kim, “Evaluating the three-dimensional printing accuracy of partial-arch models according to outer wall thickness: An in vitro study,” *Materials*, vol. 14, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/ma14226734.
- [4] M. Attaran, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,” *Bus Horiz*, vol. 60, no. 5, pp. 677–688, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.
- [5] S. H. Shin, J. H. Lim, Y. J. Kang, J. H. Kim, J. S. Shim, and J. E. Kim, “Evaluation of the 3d printing accuracy of a dental model according to its internal structure and cross-arch plate design: An in vitro study,” *Materials*, vol. 13, no. 23, pp. 1–12, Dec. 2020, doi: 10.3390/ma13235433.
- [6] S. Prasad, N. A. Kader, G. Sujatha, T. Raj, and S. Patil, “3D printing in dentistry,” *J 3D Print Med*, vol. 2, no. 3, pp. 89–91, Jul. 2018, doi: 10.2217/3dp-2018-0012.
- [7] O. Rungrojwittayakul *et al.*, “Accuracy of 3D Printed Models Created by Two Technologies of Printers with Different Designs of Model Base,” *Journal of Prosthodontics*, vol. 29, no. 2. Blackwell Publishing Inc., pp. 124–128, Feb. 01, 2020. doi: 10.1111/jopr.13107.
- [8] A. Candido dos Reis, D. Cremonuzzi Tornavoi, R. Rezende Ribeiro, and J. Augusto Marcondes Agnelli, “Avaliação da resistência à fratura de resinas compostas submetidas ao envelhecimento artificial acelerado Evaluation of composite resin fracture strength submitted to the artificial aging.”
- [9] M. P. Watters and M. L. Bernhardt, “Curing parameters to improve the mechanical properties of stereolithographic printed specimens,” *Rapid Prototyp J*, vol. 24, no. 1, pp. 46–51, 2018, doi: 10.1108/RPJ-11-2016-0180.

- [10] P. Pant, R. L. Peng, J. Moverare, K. Simonsson, Linköpings universitet. Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling, and Linköpings universitet. Tekniska fakulteten, *Residual Stress Distributions in Additively Manufactured Parts Effect of Build Orientation*.
- [11] M. Štaffová, F. Ondreáš, J. Svatík, M. Zbončák, J. Jančář, and P. Lepcio, "3D printing and post-curing optimization of photopolymerized structures: Basic concepts and effective tools for improved thermomechanical properties," *Polym Test*, vol. 108, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107499.
- [12] Z. Zguris, "How Mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing."
- [13] C. Mendes-Felipe, D. Patrocinio, J. M. Laza, L. Ruiz-Rubio, and J. L. Vilas-Vilela, "Evaluation of postcuring process on the thermal and mechanical properties of the Clear02™ resin used in stereolithography," *Polym Test*, vol. 72, pp. 115–121, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.10.018.
- [14] A. Bardelcik, S. Yang, F. Alderson, and A. Gadsden, "The effect of wash treatment on the mechanical properties and energy absorption potential of a 3D printed polymethyl methacrylate (PMMA)," *Mater Today Commun*, vol. 26, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101728.
- [15] E. Marin *et al.*, "UV-curing and thermal ageing of methacrylated stereolithographic resin," *Polym Degrad Stab*, vol. 185, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109503.
- [16] S. Aati *et al.*, "Effect of post-curing light exposure time on the physico-mechanical properties and cytotoxicity of 3D-printed denture base material," *Dental Materials*, vol. 38, no. 1, pp. 57–67, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.dental.2021.10.011.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Iniciou-se em 2021, no Programa de Pós-graduação em Odontologia da PUC Minas um projeto de pesquisa para a avaliação de métodos que possam aumentar a eficácia e a eficiência de confecção de alinhadores *in-office*. Com a parceria estabelecida com o Programa de Pós-graduação do Curso de Engenharia Mecânica da mesma instituição, ensaios laboratoriais que permitam avaliações técnicas estão sendo realizados, e a presente dissertação de Mestrado Profissionalizante é uma destas produções.

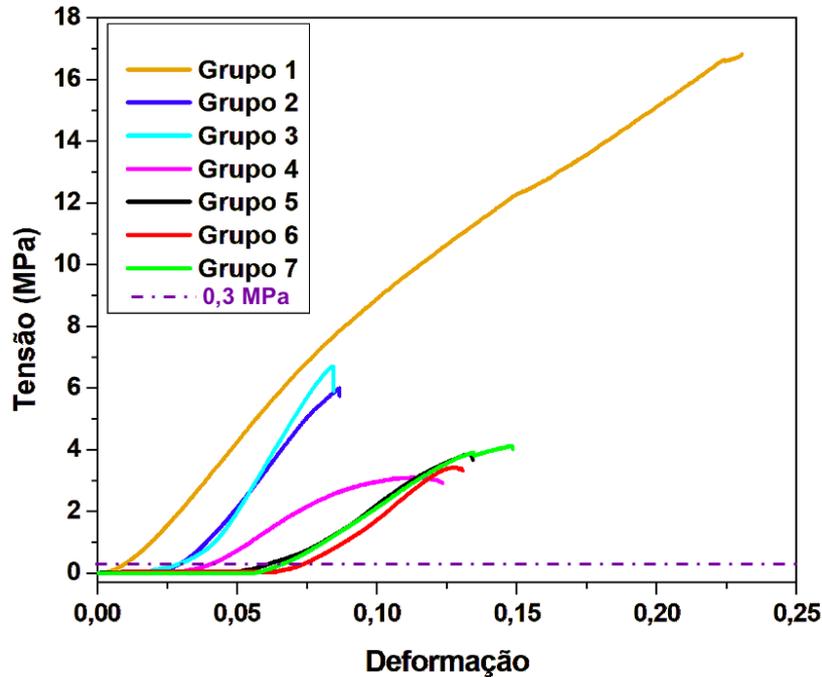
Diante do cenário de grandes inovações e tecnologias na Ortodontia atual, a produção dos alinhadores plásticos dentro do próprio consultório tem ganhado destaque. A literatura científica está carente no que diz respeito às formas de viabilizar economicamente o processo de impressão 3D de modelos dentários, etapa fundamental no processo de confecção dos alinhadores *in-office*.

Neste trabalho procurou-se responder a uma série de perguntas relacionadas à economia de resina durante impressão 3D e sua relação com a resistência à fratura do material impresso. A primeira questão levantada foi se a redução da espessura de parede do modelo impresso tem impacto na sua resistência.

A segunda questão investigou se a redução da espessura de parede e consequentemente da resistência à fratura tem algum impacto na termoplastificação à pressão durante a produção de alinhadores *in-office*.

Através de um estudo experimental e analítico foi possível concluir que tornar o modelo 3D impresso oco está relacionado à redução da resistência à fratura. Todavia, os valores de força aplicados no modelo impresso sem preenchimento no ensaio laboratorial do estudo são grandiosos de forma que seja possível realizar a termoplastificação de laminados de PETG para fabricar os alinhadores com pressão de 4 bar sem fraturar modelos recém confeccionados, conforme ilustrado no Gráfico 1.

Gráfico 1: Representação linear tracejada de 0,3 MPa indicando a tensão máxima usualmente exercida durante termoplastificação sob pressão da máquina Ministar



Fonte: Elaborado pela autora.

Até o momento não havia estudos com recomendações para a espessura da parede de modelos dentários impressos em 3D sem preenchimento interno. Teoricamente sugeria-se a adição do *infill* no modelo com objetivo de aumentar a resistência, mas foi visto que a adição do preenchimento interno não aumenta a resistência total e sim a flexibilidade. E, no contexto da confecção dos alinhadores *in-office* a partir de laminados plásticos a flexibilidade não é um problema, já que permite a remoção do modelo impresso do plástico PETG após a termoplastificação sem fratura da estrutura.

O ensaio laboratorial do presente estudo foi realizado em temperatura ambiente, em uma realidade onde a termoplastificação do laminado plástico sob vácuo ou pressão acontece diante do aquecimento do material. Esse aquecimento pode gerar algum processo de degradação complementar dos componentes da resina impressa.

A percepção do envelhecimento de 45 dias levando a um aumento da flexibilidade e diminuição da resistência compressiva pode levar a inferir que no armazenamento de médio/longo prazo do modelo impresso, a resistência à

compressão pode ficar abaixo do limiar mínimo de tolerância que seria 0,4 Mpa. O estudo da degradação da resina do corpo de prova pelas questões temporais e térmicas será realizado em investigação futura em um projeto já em andamento.

No presente estudo nenhuma configuração de pressão na termoplastificadora *Ministar* foi suficiente para fraturar nenhum dos modelos da análise qualitativa. Vale ressaltar que o ensaio foi realizado em um arco mandibular, um modelo com estrutura de apoio completo. Para o arco maxilar, que apresenta a projeção do palato e uma falta de apoio nessa região, a resistência compressiva pode seguir outros parâmetros que não foram avaliados nesse estudo.

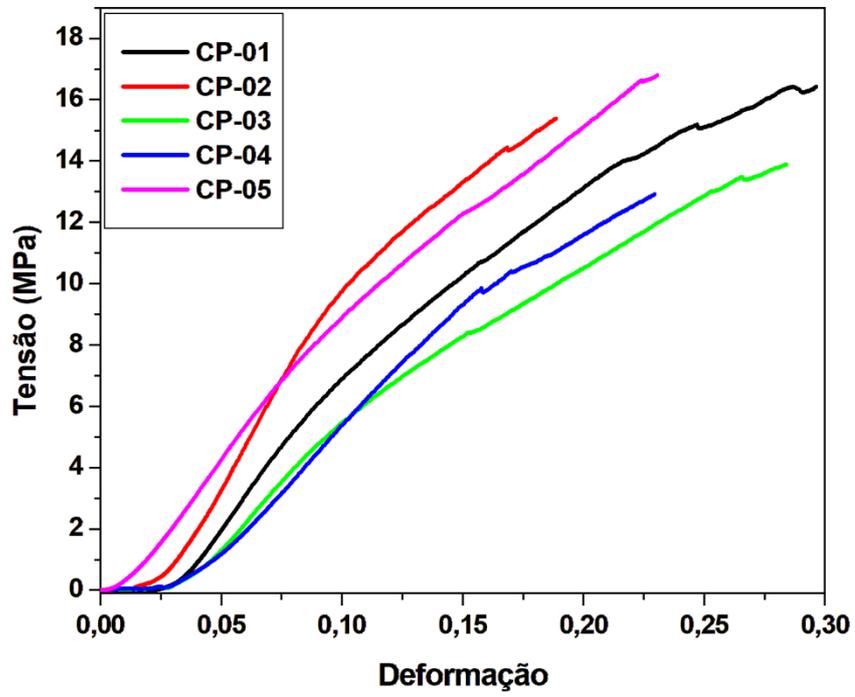
De modo final, o propósito principal do presente estudo é a economia de resina. Sabe-se que o modelo impresso sólido é muito resistente e suporta até 18 MPa (180 bar) de compressão, em um contexto laboratorial onde a termoplastificação à pressão atinge o valor máximo de 0,4 MPa e a termoplastificação à vácuo representa 0,1 MPa, não justificando o gasto excessivo de material e o custo financeiro envolvido no processo.

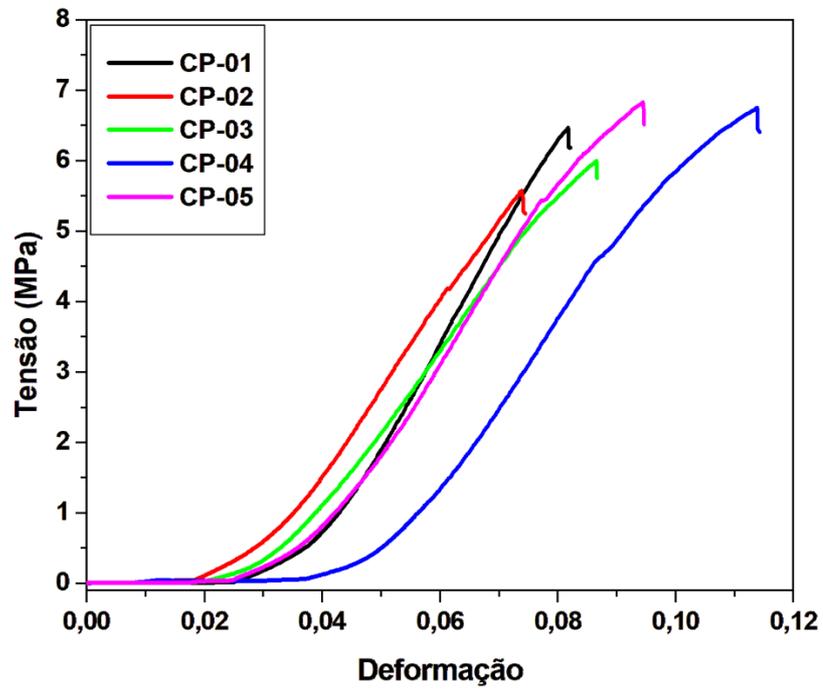
REFERÊNCIAS

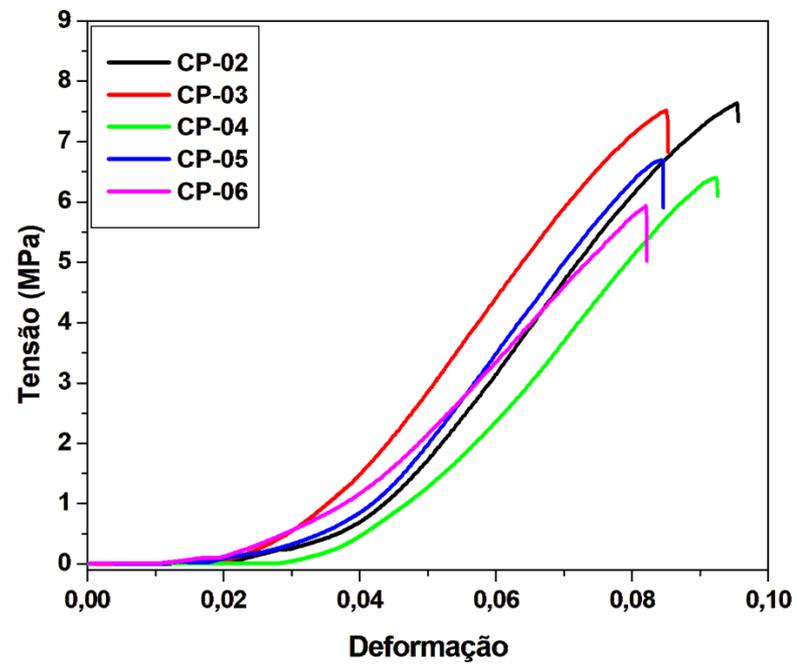
CUNHA, Taís de Moraes Alves da; BARBOSA, Inessa da Silva; PALMA, Karolinne Kaila. Orthodontic digital workflow: devices and clinical applications. **Dental Press Journal of Orthodontics**, v. 26, n. 6, e21spe6, 2021.

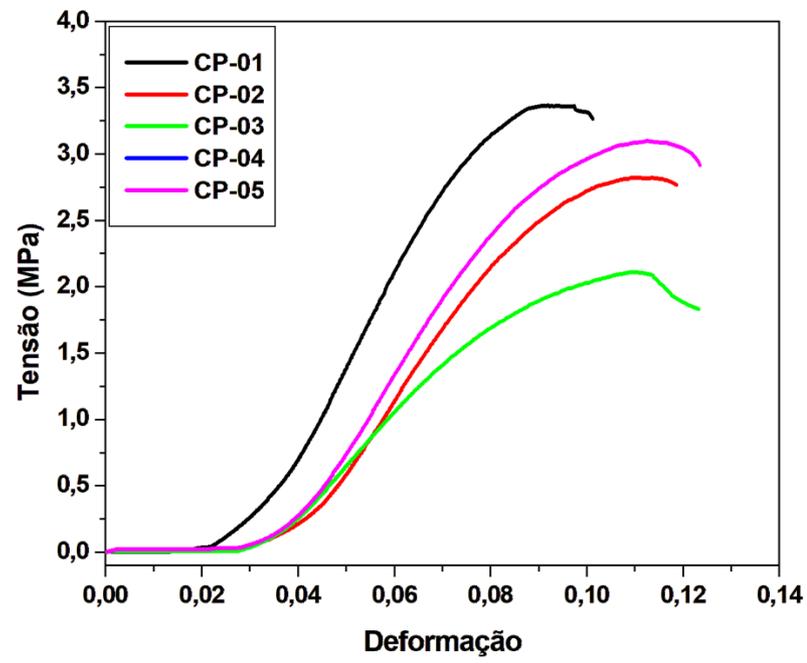
RICCIO, Carmela *et al.* Effects of Curing on Photosensitive Resins in SLA Additive Manufacturing. **Applied Mechanics**, v. 2, n. 4, p. 942-955, 2021.

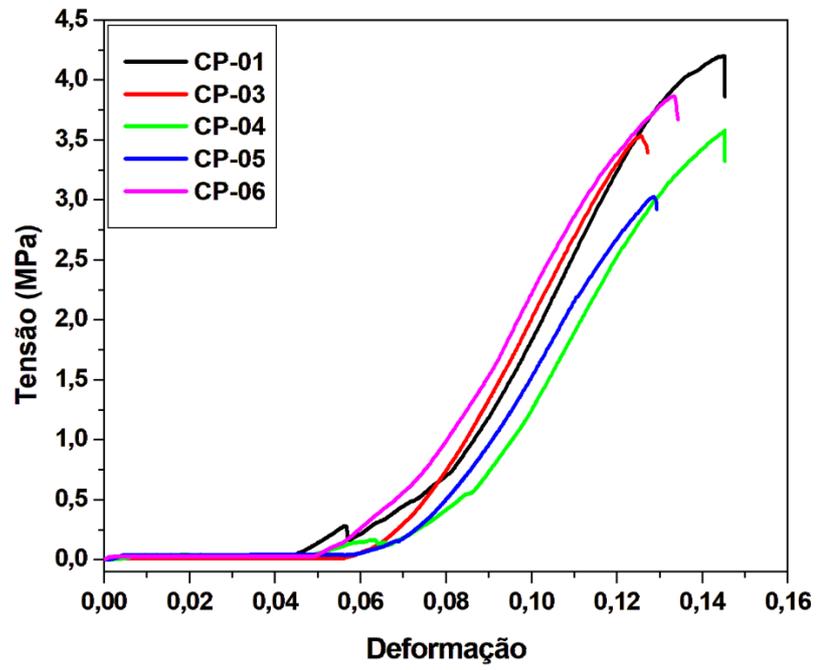
TANEVA, I.; UZUNOV, T. Influence of post-polymerization processing on the mechanical characteristics of 3D-printed occlusal splints. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1492, p. 012018, 2020.

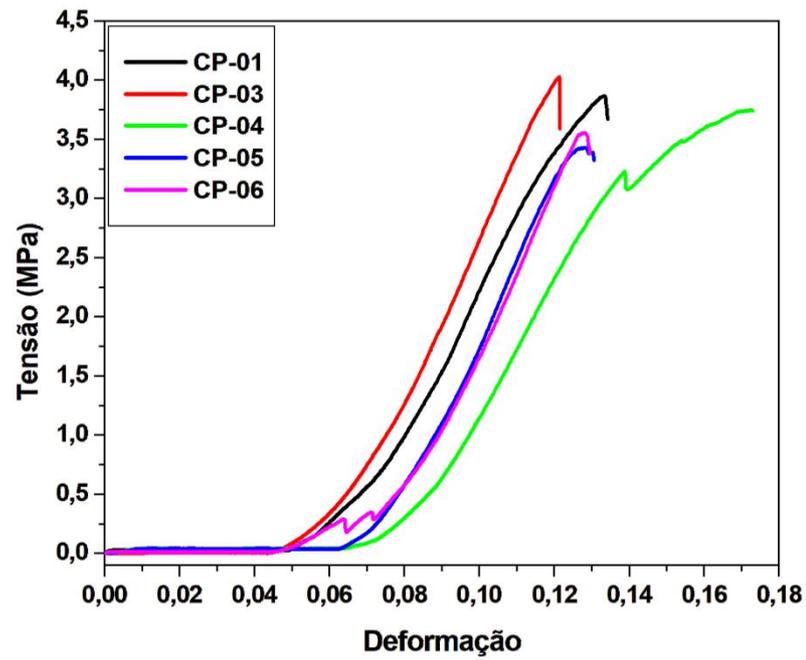
ANEXO A - Corpos de prova novos e sólidos

ANEXO B - Corpo de prova novo com 2 mm sem *infill*

ANEXO C - Corpos de prova novos com 1 mm sem *infill*

ANEXO D - Corpos de prova novo com 1 mm e *infill*

ANEXO E – Corpos de prova envelhecidos com 2 mm sem *infill*

ANEXO F – Corpos de prova envelhecidos com 1 mm sem *infill*

ANEXO G – Corpos de prova envelhecidos com 1 mm e *infill*