DIRECT PRINTED ALIGNERS - UMA NOVA TECNOLOGIA DE ALINHADORES

Gabriela Oliveira Carvalho[1]; João Pedro Petinari Ferrato de Freitas[2] ; Letícia Barbosa Borges[3] ; Marcos Wesley Pereira Costa[4] ; Marina Holz de Luna[5]; Vitória Julliany da Silva[6] ; Adriana Cândida Albuquerque Nogueira[7]

[2] Discente do Curso de Graduação Bacharelado em Odontologia do UNIVAG-Centro Universitário. Várzea Grande. Mato Grosso.

[7] Professor(a) orientador(a) Dr.(a) do Curso de Graduação Bacharelado em Odontologia do UNIVAG-Centro Universitário. Várzea Grande. Mato Grosso.

Endereço para correspondência: adriana.nogueira@univag.edu.br; jppetinari08@gmail.com

RESUMO

Os alinhadores ortodônticos têm transformado a prática da ortodontia, sendo amplamente buscados devido à estética, conforto e eficácia. Desde os primeiros modelos da década de 1950, esses dispositivos passaram por avanços significativos, culminando na adoção de materiais mais eficientes e tecnologias modernas, como a impressão 3D e os polímeros com memória de forma (SMPs). A impressão 3D oferece vantagens, incluindo maior precisão, menor impacto ambiental e personalização otimizada. Este trabalho, fundamentado em uma revisão de literatura, busca avaliar a eficácia dos alinhadores ortodônticos impressos diretamente, com foco em sua eficiência no tratamento de más oclusões, impacto na prática clínica e aceitação por pacientes e dentistas. A hipótese central é de que os alinhadores impressos diretamente apresentam vantagens superiores em comparação aos modelos termoplastificados, como maior adaptação, conforto e custo-benefício. Os benefícios destacados incluem maior velocidade de produção, menor geração de resíduos e otimização no processo de confecção. Conclui-se que essa tecnologia promete revolucionar ainda mais o campo ortodôntico, com potencial para se tornar uma solução padrão na prática clínica.

Palavras-chave: Alinhadores; Impressão 3D; Ortodontia; Direct printed aligners

1. INTRODUÇÃO

Os alinhadores ortodônticos estão mudando a prática da ortodontia sendo o sistema mais procurado nos consultórios odontológicos (Kau, et al. 2023). Os mesmos proporcionam uma experiência de tratamento estético e confortável, facilitam a higiene oral, causam menos dor em comparação aos aparelhos ortodônticos fixos, reduzem o número e a duração das consultas e exigem menos visitas de emergência (Tamer, Oztas, Marsan. 2019).

Os primeiros alinhadores foram documentados na década de 1950, tratando-se de um aparelho termoplástico transparente que era feito a vácuo e mostrava uma firme adaptação ao molde do paciente. Desde então, os alinhadores ortodônticos passaram por várias transformações ao longo dos anos. A necessidade de eficiência clínica aprimorada para tratar várias más oclusões aumentou, então houve uma evolução nos materiais clínicos (Kau, et al. 2023).

Muitos fabricantes afirmam que vários fatores, como o tipo de material, a espessura do plástico e suas propriedades mecânicas, influenciam a eficácia e a eficiência do alinhador final produzido. Assim como as impressões digitais e os modelos impressos em 3D provaram ser superiores às impressões manuais e aos modelos de gesso, os alinhadores transparentes impressos em 3D diretamente podem eliminar os erros resultantes do fluxo de trabalho termoplástico, além dos erros resultantes das impressões analógicas (Kau, et al. 2023).

A última tendência no desenvolvimento de OAT (Orthodontic Aligner Therapy) são os polímeros com memória de forma (SMPs) e a impressão 3D direta dos alinhadores. Os SMPs são um tipo de material inteligente ou material polimérico responsivo a estímulos. Ao contrário dos materiais que mudam de forma (materiais convencionais), os materiais com memória de forma têm a capacidade de manter uma forma temporária estável ao receberem forças, até que sejam adequadamente ativados para recuperar sua forma original (Kau, et al. 2023).

1.1 Justificativa

Os alinhadores transparentes têm sido utilizados como alternativa aos aparelhos ortodônticos devido ao seu baixo impacto na qualidade de vida, eficácia para más oclusões de baixo grau e planejamento individualizado. A impressão 3D apresenta vantagens quando comparada às técnicas convencionais, incluindo velocidade de fabricação, melhor ajuste ao paciente e técnicas de modelagem menos invasivas, bem como a integração de tecnologias mais avançadas (Narongdej, et al. 2024).

Este estudo pretende investigar os impactos dessa tecnologia no tratamento ortodôntico, analisando não apenas sua eficácia, mas também a aceitação pelos pacientes e dentistas. A pesquisa pode contribuir para uma melhor compreensão dos alinhadores, fornecendo dados relevantes para profissionais da área.

1.2 Objetivo geral

Avaliar a eficácia dos alinhadores ortodônticos impressos no tratamento ortodôntico, através de revisão de literatura.

1.3. Objetivos específicos

1. Apresentar o processo de confecção dos alinhadores;

2. Discorrer sobre as propriedades químicas das resinas de impressão;
3. Identificar possíveis complicações ou limitações enfrentadas pelo paciente durante o tratamento com os alinhadores ortodônticos impressos;
4. Apresentar ao ortodontista a liberdade e fabricar seus alinhadores em consultório, sem estar ligado a marcas comerciais.

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

Será realizada uma revisão de literatura por meio de um levantamento bibliográfico de artigos científicos, publicados nos últimos 5 anos. A procura dos artigos acontecerá por meio das bases eletrônicas: Google Acadêmico, PUBMED, BVS e SCIELO. As palavras-chaves são: alinhadores, impressão 3D, ortodontia, direct printed aligners.

3. RESULTADOS

Os alinhadores transparentes consolidaram-se como uma alternativa eficaz aos aparelhos ortodônticos convencionais, destacando-se por três aspectos principais: (1) menor impacto na qualidade de vida dos pacientes, (2) eficácia comprovada no tratamento de más oclusões de baixa complexidade e (3) possibilidade de personalização para cada caso clínico. Historicamente, sua fabricação passou por significativas evoluções tecnológicas: desde os primeiros modelos produzidos por termoformação a vácuo e moldagem em gesso até os atuais sistemas de impressão 3D, que representam o estado da arte em produção digital (Narongdej et al., 2024).

A demanda por alinhadores ortodônticos surgiu como resposta à necessidade crescente de tratamentos estéticos e discretos. A evolução histórica dessa tecnologia remonta a quase oito décadas, iniciando-se com o desenvolvimento do posicionador dentário pelo Dr. Kesling em 1945 (Alkhamees, A., 2024). Fabricado em borracha a partir de modelos dentários, este dispositivo era utilizado imediatamente após a remoção dos braquetes com o objetivo de corrigir pequenas irregularidades residuais (Panayi, N.C. 2023), sendo empregado em tempo integral para promover movimentação dentária eficaz.

O desenvolvimento tecnológico prosseguiu com Nahoum, que introduziu um aparelho de contorno dentário termoformado a vácuo. Este sistema consistia em dois blocos independentes para as arcadas superior e inferior, com aplicação primária nos dentes anteriores. Uma inovação significativa ocorreu em 1993, quando Sheridan desenvolveu o aparelho Essix, originalmente concebido como retentor ortodôntico (Alkhamees, A. 2024). Este dispositivo combinava as funções de contenção com procedimentos de redução interproximal, permitindo a correção de discrepâncias ortodônticas menores.

Um marco significativo ocorreu em 1997, quando Zia Christi e Kelsey Wirth fundaram a Align Technology (Santa Clara, Califórnia, EUA), introduzindo o sistema Invisalign (Panayi, N.C. 2023). Esta inovação combinou a tecnologia de folhas plásticas (Essix) com o conceito do posicionador dentário, resultando no primeiro

aparelho ortodôntico fabricado com materiais poliméricos transparentes e termoplásticos mediante tecnologia CAD/CAM. Este avanço revolucionário substituiu definitivamente os métodos manuais de fabricação, estabelecendo um fluxo de trabalho padronizado para produção em massa (Alkhamees, A. 2024).

A evolução digital subsequente permitiu o desenvolvimento paralelo de outras tecnologias. Inicialmente limitada à produção de modelos dentários, a impressão 3D com resinas expandiu suas aplicações para diversas áreas da odontologia, incluindo a fabricação de coroas, talas oclusais e bandejas de colagem indireta (Panayi, M.C. 2023). O ápice desta trajetória ocorreu em 2019, quando a empresa sul-coreana Graphy introduziu o material TC-85DAC, a primeira resina específica para impressão direta de alinhadores, eliminando a etapa intermediária de impressão de modelos dentários (Alkhamees, A. 2024).

A impressão 3D permite a fabricação de peças camada por camada em vez de métodos comuns de fabricação que dependem de usinagem, moldagem e métodos subtrativos. Os materiais atuais usados para impressão 3D em ortodontia incluem plástico acrilonitrila-butadieno-estireno, materiais de estereolitografia (resinas epóxi), ácido polilático, poliamida (nylon), poliamida com enchimento de vidro, prata, aço, titânio, fotopolímeros, cera e policarbonato (Tartaglia et al. 2021). Embora diversos materiais estejam presentes no mercado, nenhum material imprimível em 3D atualmente disponível comercialmente atende aos padrões de biocompatibilidade, translucidez e propriedades mecânicas apropriadas. A única exceção é a Tera Harz TC-85 (Graphy, Seul, Coreia do Sul), que, de acordo com o site da empresa, foi aprovado por várias agências internacionais, incluindo a Korea Food and Drug Administration, European Commission, e a U.S. Food and Drug Administration (Alkhamees, A. 2024).

Quanto ao processo de fabricação, vários métodos de impressão 3D, como fabricação de filamentos fundidos, sinterização ou fusão seletiva a laser, aparelho de estereolitografia, processo de polímero fotocurado multijato, tecnologia de fusão multijato HP ou tecnologia de produção de interface líquida contínua, e impressão de ligante em pó, podem ser usados para a impressão direta de alinhadores. No entanto, a impressão 3D por meio de fotopolimerização de resinas transparentes parece ser uma opção promissora, pois as características específicas e os requisitos das propriedades do material são mais apropriados. (Alkhamees, A. 2024).

3.1. Fluxo de Trabalho para Produção de Alinhadores Ortodônticos: Métodos Termoformados versus Impressão Direta.

O processo de fabricação de alinhadores termoformados em consultório segue um protocolo estabelecido, iniciando-se com a importação de escaneamentos dentários digitais para um software CAD ortodôntico especializado. Nesta fase, o profissional edita digitalmente os modelos, ajustando a oclusão e incluindo virtualmente os anexos necessários. Uma vez concluído o planejamento, o software gera automaticamente os modelos 3D que serão impressos e posteriormente utilizados como base para a termoformação dos alinhadores (Panayi, N.C., 2023).

Já a técnica de impressão direta de alinhadores apresenta particularidades significativas. Embora utilize os mesmos softwares CAD - como o Deltaface (Coruo, Limoges, França) e Maestro (New Age, Pisa, Itália) - para o planejamento inicial, o processo diverge na etapa de produção. O Deltaface destaca-se por permitir ajustes precisos de espessura em áreas específicas, como o reforço palatino para movimentação de incisivos inferiores, com controle milimétrico pelo operador. O protocolo atual recomenda espessuras padronizadas de 0,5 mm para alinhadores de uso semanal e 0,7 mm para períodos de dez dias.

Os arquivos finais, exportados no formato Standard Tessellation Language (STL), são processados por impressoras 3D do tipo VAT (Estereolitografia), sendo as DLP (Direct Light Projection) as mais utilizadas na prática clínica. O posicionamento dos alinhadores na plataforma de impressão - horizontal ou vertical - apresenta trade-offs distintos: enquanto a disposição horizontal acelera o processo com menos camadas, requer mais suportes e reduz a capacidade de produção simultânea; a vertical, embora mais lenta, permite maior volume de impressão com menos suportes, porém com maior risco de erros.

A fase pós-impressão é crítica para a qualidade final. Os alinhadores recém-impressos são submetidos a centrifugação a 500-600 rpm por 5-6 minutos para remoção de resina excedente, seguida de cura em unidade UV especializada (Tera Harz, Graphy, Coreia) com atmosfera de nitrogênio - essencial para garantir polimerização completa e propriedades mecânicas ideais. O processo final inclui polimento das áreas de suporte e imersão em água quente para eliminação de resíduos, assegurando biocompatibilidade e conforto ao paciente (Panayi, N.C., 2023)

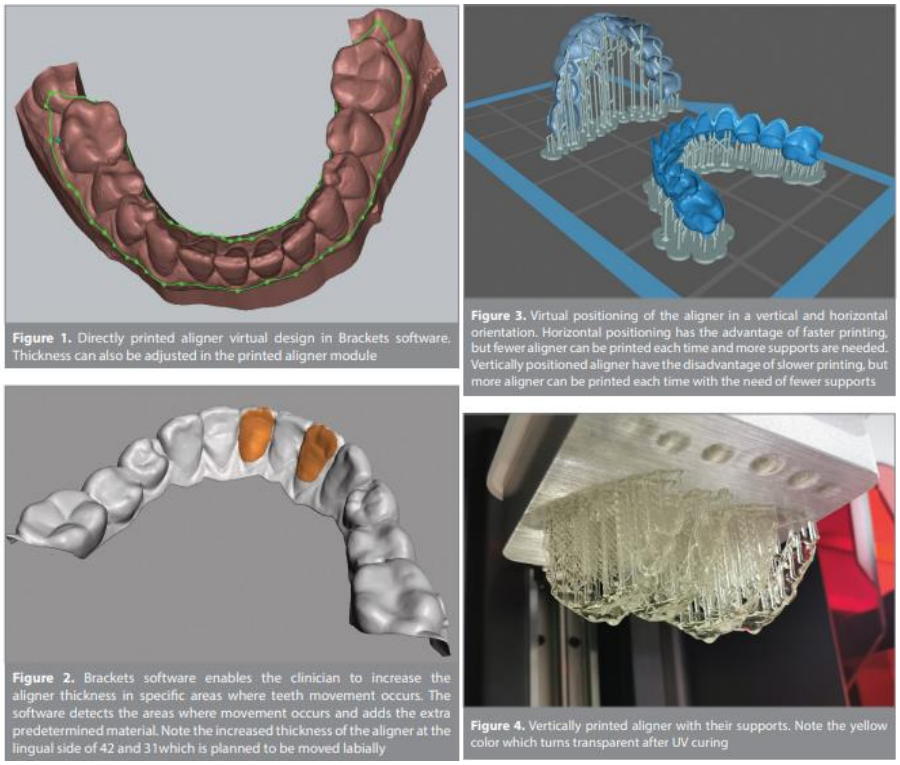

Figura 1. Processo de confecção de alinhador impresso em 3D

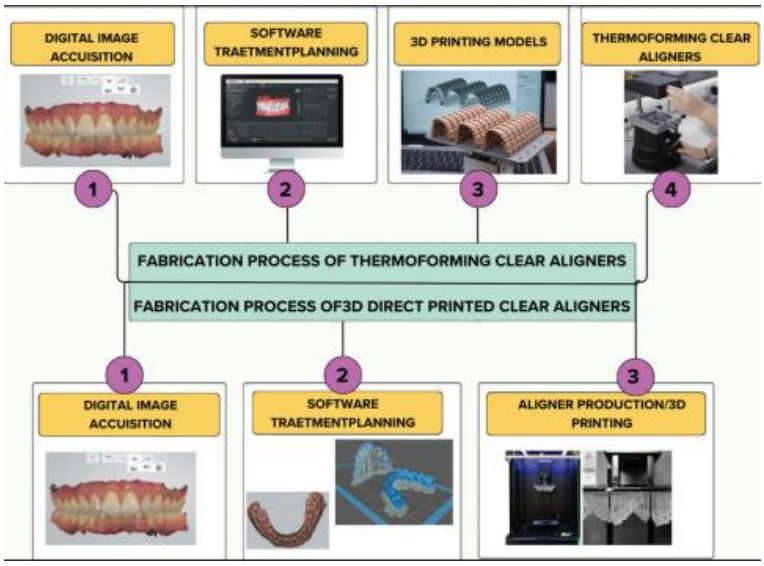

Figura 2. Demonstração do fluxo de trabalho para alinhadores termoformados e alinhadores impressos diretamente.

3.2. Consequências clínicas e de pesquisa: Estudos e considerações sobre alinhadores impressos

A introdução de novos materiais e dispositivos na ortodontia exige rigorosa avaliação científica prévia à aplicação clínica. Os alinhadores impressos diretamente, como qualquer inovação terapêutica, necessitam de extensa validação in vitro e in vivo antes de substituírem os sistemas termoformados convencionais (Alkhamees, A. 2024). O estudo pioneiro de Can et al. avaliou as propriedades mecânicas desses alinhadores sob condições de envelhecimento in vivo, utilizando o protocolo inicial com cura convencional em atmosfera oxigenada. Os resultados revelaram perdas insignificantes das propriedades mecânicas após uma semana de uso, contrastando marcadamente com a redução de aproximadamente 50% observada em alinhadores Invisalign no mesmo período.

A manufatura aditiva de alinhadores representa um processo multifásico onde cada etapa - desde o design digital até a pós-produção - influencia diretamente a qualidade final. Diferentemente de outros dispositivos ortodônticos impressos (como talas oclusais ou bandejas de colagem indireta), os alinhadores destacam-se como únicos aparelhos ativos capazes de exercer forças diretamente sobre a dentição, característica que exige padrões ainda mais rigorosos de controle de qualidade (Panayi, N.C. 2023).

A fase inicial de design digital apresenta desafios críticos. Estudos demonstram variações na qualidade dos arquivos 3D exportados, mesmo quando gerados pelo mesmo software ou para o mesmo paciente. Arquivos corrompidos ou com defeitos na malha podem comprometer a estrutura do alinhador e resultar em falhas de impressão (Panayi, N.C. 2023). A orientação de impressão (horizontal versus vertical) também influencia significativamente as propriedades finais do dispositivo: enquanto a posição horizontal reduz o número de camadas e o tempo de impressão, a vertical permite maior volume de produção, porém com potencial aumento da rugosidade superficial devido ao maior número de camadas.

Uma investigação recente de Zinelis et al. evidenciou que diferentes tecnologias de impressão (laser, projetor de luz ou LED) produzem alinhadores com propriedades mecânicas distintas. As impressoras LED demonstraram superioridade na dureza dos dispositivos, embora ainda não existem evidências conclusivas sobre como essas variações afetam a eficácia clínica. Igualmente crucial é a avaliação da consistência intraimpressora - a capacidade de reproduzir as mesmas propriedades mecânicas em sessões repetidas com o mesmo arquivo digital (Panayi, N.C. 2023).

O processo pós-impressão envolve etapas críticas:

1. Centrifugação (5-6 minutos a 500-600 rpm) para remoção de resina excedente
2. Cura UV em atmosfera controlada (unidade Tera Harz com gerador de nitrogênio)
3. Polimento das áreas de suporte
4. Imersão em água quente para remoção de resíduos

A cura UV merece especial atenção, pois determina as propriedades finais do dispositivo. A polimerização incompleta pode resultar em: Redução da biocompatibilidade; Maior risco de reações alérgicas; Comprometimento das propriedades mecânicas; Alterações na transparência e rugosidade superficial.

Estudos comparativos demonstraram que alinhadores impressos apresentam melhor adaptação à superfície dentária (KOENIG et al.) e menor resistência ao escoamento que os termoformados convencionais em PETG. Contudo, a natureza descartável desses dispositivos - substituídos semanal ou quinzenalmente - exige atenção redobrada à possibilidade de lixiviação de componentes químicos, reforçando a necessidade de testes exaustivos de biocompatibilidade antes da liberação clínica (Panayi, N.C. 2023).

3.3 Técnicas e Materiais para a confecção do aparelho invisível impresso

Os alinhadores são produzidos principalmente usando técnicas de fabricação aditiva como Modelagem de Deposição Fundida (FDM), Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e outras de acordo com padrões internacionais. Outra técnica de impressão 3D que utiliza materiais de resina fotossensível inclui polyjet (PJ) e fotopolimerização em cuba (VP), que se destacam como escolhas preferidas para alinhadores ortodônticos transparentes devido à sua capacidade de curar e modelar materiais sob irradiação de luz. O processo de polimerização ocorre após os fotoiniciadores gerarem radicais livres mediante exposição a um comprimento de onda UV específico e então os monômeros e oligômeros começam a formar ligações por meio do mecanismo de polimerização radical em cadeia. O processo de impressão 3D VP pode ser ainda mais classificado com base na fonte de luz e padrão empregados, usando técnicas como estereolitografia (SLA), tela de cristal líquido (LCD) e processamento digital de luz (DLP). (Narongdej et al., 2024).

DLP é a outra forma de VP que utiliza um microssistema que consiste em um arranjo retangular de espelhos, conhecido como “micro refletor digital”. Cada espelho representa um pixel singular, e a resolução geral de impressão de uma imagem projetada depende do número total de espelhos. Como os ângulos de cada

micro refletor podem ser ajustados individualmente e livremente, a luz emitida pela fonte de luz é então refratada por esses micros espelhos e é projetada na superfície da resina líquida para iniciar a polimerização. Devido à combinação de alta precisão e curta duração de impressão do DLP, este método de impressão é considerado adequado para aplicações odontológicas e ortodônticas. Especificamente, o DLP é considerado a opção mais adequada na fabricação de alinhadores transparentes a partir de resinas transparentes. (Narongdej et al., 2024). A tecnologia DLP tem uma vantagem adicional de tempo de impressão reduzido, pois polimeriza uma camada inteira em uma única irradiação a laser por meio de projeção de pixels e, além disso, ao considerar o tratamento do lado da cadeira, o tempo do fluxo de trabalho se torna um fator importante e, portanto, os fluxos de trabalho baseados em DLP podem ser preferidos. (Venezia et al.).

Vários métodos de impressão 3D, como fabricação de filamentos fundidos, sinterização ou fusão seletiva a laser, aparelhos de estereolitografia, processo de polímero fotocurado multijato, tecnologia de fusão multijato HP ou tecnologia de produção de interface líquida contínua e impressão de ligante em pó, podem ser usados para a impressão direta de alinhadores. No entanto, a impressão 3D por meio de fotopolimerização de resinas transparentes parece ser uma opção promissora, pois as características específicas e os requisitos das propriedades do material são mais apropriados. A impressão 3D de um alinhador ortodôntico começa essencialmente com as mesmas etapas iniciais dos alinhadores termoformados. Primeiro, uma varredura intraoral do paciente é obtida e importada para o software CAD ortodôntico, onde a má oclusão inicial é visualizada, o tipo de fixação e a colocação são planejados e a espessura do alinhador é ajustada. Uma vez que o alinhador esteja totalmente planejado, o design é exportado no formato “Standard Tessellation Language”. (Alkhamees., 2024).

A etapa subsequente de impressão do alinhador depende da impressora 3D usada, pois cada impressora usa uma tecnologia, software e métodos de posicionamento de suporte diferentes. Os suportes são muito importantes para uma impressão precisa e exata, a velocidade de impressão difere entre alinhadores impressos em 3D posicionados horizontalmente e verticalmente. Os alinhadores posicionados verticalmente têm menos suportes e são impressos mais lentamente, enquanto os alinhadores posicionados horizontalmente têm mais suporte junto com maior velocidade de impressão devido a menos camadas que deve ser impressa. (Alkhamees., 2024).

A temperatura controlada da resina deve ser de aproximadamente 30°C para evitar a possibilidade de falha. Uma vez concluída a impressão, a 3ª etapa envolve remover o alinhador da plataforma da impressora e colocá-lo em uma máquina de centrifugação com suas partes internas voltadas para fora para remover o excesso de resina não curada.

O tempo de centrifugação é de aproximadamente 5–6 min a uma velocidade de 500–600 rpm. Na 4ª etapa, os suportes são removidos e o alinhador é curado em uma unidade de cura UV dedicada. A cura é feita de acordo com as recomendações do fabricante para alinhadores impressos com LEDs de alta

intensidade e geradores de nitrogênio para garantir a cura sem a presença de oxigênio. O fator-chave é que a presença de oxigênio inibe a polimerização completa, o que afeta a as propriedades mecânicas do alinhador.

Após a polimerização completa, o alinhador se torna totalmente biocompatível, e sua cor muda de amarelo para transparente. Após a cura, a quinta etapa envolve o polimento do alinhador em áreas necessárias, por exemplo, onde os suportes costumavam ficar. Finalmente, o alinhador é imerso em água quente por alguns segundos, removendo qualquer possível resíduo de substâncias que possam criar problemas para o paciente. (Alkhamees., 2024).

3.4. Materiais para a impressão 3D

Vários materiais são usados para a impressão 3D de aparelhos em odontologia. Os materiais atualmente usados para impressão 3D em ortodontia incluem plástico acrilonitrila-butadieno-estireno, materiais de estereolitografia (resinas epóxi), ácido polilático, poliamida (nylon), poliamida com enchimento de vidro, prata, aço, titânio, fotopolímeros, cera e policarbonato.

Embora diversos materiais estejam presentes no mercado, nenhum material imprimível em 3D atualmente disponível comercialmente atende aos padrões de biocompatibilidade, translucidez e propriedades mecânicas apropriadas. A única exceção é Tera Harz TC-85 (Graphy, Seul, Coreia do Sul), que, de acordo com o site da empresa, foi aprovado por várias agências internacionais. (Alkhamees., 2024) sendo uma resina fotocurável biocompatível transparente que afirma ser equipada com uma função de memória de forma (Kau. C. 2023).

3.5. Vantagens dos alinhadores impressos em 3D com memória de forma em relação aos convencionais termoplastificados.

Com o avanço da tecnologia, as impressoras 3D estão se tornando mais sofisticadas, acessíveis e compactas, impulsionando a popularidade da produção de alinhadores diretamente no consultório. A possibilidade de imprimir os alinhadores sem a etapa intermediária de um modelo dental representa um avanço significativo na ortodontia digital (Alkhamees, A. 2024.).

Nesse contexto, a impressão 3D por fotopolimerização de resinas transparentes tem se destacado como uma solução promissora, pois suas propriedades atendem de forma mais eficaz às exigências específicas da ortodontia. (Alkhamees, A. 2024).

Os alinhadores em sua forma termoformada conquistaram uma parte relativamente grande do mercado de aparelhos ortodônticos. No entanto, sua capacidade de corrigir problemas ortodônticos é questionada, especialmente em tipos específicos de movimentação dos dentes. O alinhador impresso parece ser uma nova modalidade de tratamento que pode resolver os problemas que surgem com o uso do alinhador. As vantagens dos alinhadores impressos em comparação com os termoformados são suficientes para motivar as empresas a inventar novas resinas para alinhadores e evoluí-las na tentativa de alcançar a eficácia dos aparelhos fixos.

As propriedades mecânicas devem ser otimizadas para que o alinhador impresso seja igual ou até superior ao alinhador termoformado existente (Panayi, M.C. 2023).

Os alinhadores transparentes têm sido utilizados como alternativa aos aparelhos ortodônticos convencionais devido ao seu baixo impacto na qualidade de vida, relativa eficácia no tratamento de más oclusões leves e adaptação personalizada para cada paciente. As técnicas de fabricação evoluíram desde a criação dos alinhadores, incluindo termoformagem a vácuo, moldagem em gesso e, mais recentemente, impressão 3D. (Narongdej, P. et al., 2024).

Alguns estudos foram realizados e destacaram algumas das vantagens dos alinhadores impressos em 3D. Um resumo dessas vantagens inclui o seguinte:

1. Eliminação da etapa de impressão do modelo dentário:
A impressão direta do alinhador reduz o processo de fabricação geral, o que leva a um fluxo de trabalho mais rápido e uma entrega mais ágil dos alinhadores ao paciente;
2. Possibilidade de ter um pequeno laboratório digital no consultório ortodôntico:
A remoção da etapa de impressão do modelo dentário, da etapa de termoformagem e da remoção do alinhador do modelo, bem como a etapa de acabamento, elimina a necessidade de um grande espaço de trabalho para armazenar múltiplos modelos e máquinas. A necessidade de uma peça de mão para remover o alinhador do modelo dentário também é eliminada, tornando a produção do alinhador mais rápida e eficiente. Como os alinhadores impressos não passam por essas etapas demoradas, isso economiza tempo para o ortodontista e cria um procedimento mais fácil e limpo;
3. Ambiente de laboratório sem poeira, sem gesso e mais limpo:
O alinhador termoformado precisa ser limpo e polido nas extremidades para criar uma borda suave. Todos esses processos geram uma grande quantidade de poeira e partículas pequenas, o que cria um ambiente de trabalho sujo e poluído, prejudicial aos trabalhadores. Todas essas etapas são eliminadas nos alinhadores impressos em 3D, resultando em um escritório mais limpo, saudável e livre de poeira, o que é vantajoso tanto para os técnicos de laboratório quanto para os usuários do espaço;
4. Capacidade de produzir múltiplos alinhadores ao mesmo tempo:
Como os alinhadores são projetados diretamente para impressão no software, é possível imprimir múltiplos alinhadores simultaneamente, sem comprometer a precisão ou qualidade, tornando a produção em massa de alinhadores viável;
5. Redução da poluição ambiental:
Milhões de modelos dentários não recicláveis são produzidos com cada alinhador termoformado, o que gera poluição. Eliminar os modelos dentários e imprimir os alinhadores diretamente ajuda a reduzir o desperdício e proteger o meio ambiente. No futuro, o desenvolvimento de um material reciclável para impressão de alinhadores seria uma enorme contribuição para salvar o planeta;
6. Fabricação de alinhadores com maior precisão:
Dentes pequenos, como os incisivos laterais superiores e pré-molares arredondados, e a falta de um undercut que permita a aderência, são as razões mais comuns para problemas relacionados à precisão do ajuste dos alinhadores. A incapacidade de aderir aos dentes pode levar a movimentos dentários insatisfatórios. A natureza dos

alinhadores impressos em 3D permite uma precisão maior, o que resulta em um ajuste melhor e maior eficácia;

7. Maior controle sobre o movimento dentário:
A espessura do alinhador termoformado é reduzida após o procedimento de termoformagem. Uma vantagem dos alinhadores impressos é a capacidade de imprimir alinhadores com espessura uniforme, o que garante a entrega de forças uniformes a todos os dentes. Outra vantagem é a possibilidade de ter espessura personalizada, com a adição de espessura extra em áreas específicas, permitindo um melhor controle e correção da má oclusão;
8. Estética aprimorada:
Com a espessura personalizável mencionada anteriormente, melhor ajuste do alinhador e maior precisão no movimento dentário, a necessidade de múltiplos attachments dentários e elementos auxiliares é reduzida, melhorando a estética geral do tratamento com alinhadores (Alkhamees A, 2024.)

Além disso, as resinas dentárias impressas em 3D apresentam notável estabilidade de cor em comparação com materiais convencionais, especialmente durante períodos prolongados de pós-cura. Essas resinas possuem uma série de características essenciais consideradas ideais para materiais ortodônticos, incluindo alta retenção elástica, grande resistência, excelente conformabilidade, baixa rigidez, biocompatibilidade e estabilidade ambiental.

Notavelmente, a acessibilidade das impressoras 3D tem aumentado recentemente, tornando-as mais comuns em consultórios odontológicos e ortodônticos. Esse aumento na disponibilidade tem impulsionado a popularidade dos alinhadores fabricados no próprio consultório, reduzindo prazos e custos para os pacientes. (Alkhamees A, 2024).

Por fim, é importante destacar que os alinhadores impressos em 3D oferecem maior precisão geométrica, adaptada às necessidades específicas de cada paciente. Manter um contato contínuo entre o alinhador e os dentes é essencial para garantir seu desempenho ideal, pois qualquer espaço pode comprometer a eficácia do tratamento. Os alinhadores impressos em 3D apresentam propriedades mecânicas robustas, incluindo dureza, módulo de indentação e índice elástico, com apenas uma leve degradação das propriedades após uma semana de uso. Eles também são eficazes na aplicação das forças necessárias para os movimentos dentários desejados. (Alkhamees, A. 2024).

Embora os alinhadores transparentes ofereçam vantagens em simplicidade, conforto e removibilidade, preservando a estética e apoiando a higiene bucal, eles ainda enfrentam vários desafios, incluindo tempo de tratamento, precisão, fixação, custo, acessibilidade e biocompatibilidade. (Narongdej, P. et al., 2024).

O avanço contínuo no desenvolvimento de materiais tem resultado em melhorias nas propriedades mecânicas, biocompatibilidade e qualidade geral dos alinhadores. Como consequência, os alinhadores tornaram-se menos invasivos, mais acessíveis e apresentam resultados comparáveis às opções de tratamento convencionais. O grande diferencial dos alinhadores impressos em 3D está na

capacidade de tratar más oclusões de maneira eficaz, mantendo a estética do sorriso ao serem praticamente invisíveis durante todo o tratamento. (Narongdej, P. et al., 2024).

A impressão 3D apresenta diversas vantagens em comparação com as técnicas convencionais, como maior velocidade de fabricação, melhor ajuste ao paciente e métodos de modelagem menos invasivos, além da integração com tecnologias mais avançadas. No entanto, com novas metodologias, como a impressão 3D, surgem também novos desafios. Como o uso de novos materiais é necessário, seu design e segurança devem ser cuidadosamente estudados (Narongdej et al., 2024).

3.6 Material de memória de forma inteligente:

Os polímeros com memória de forma (SMPs), também chamados de polímeros em movimento ativo, são um tipo de material de memória de forma inteligente. O mecanismo de memória de forma dos SMPs depende da presença de dois pré-requisitos: uma rede de polímeros estável determina a forma original e um polímero de comutação reversível responsável por fixar a forma temporária. Os SMPs possuem grande atratividade devido à sua significativa capacidade de deformação elástica, baixo custo, baixa densidade, facilidade de produção, programação flexível, propriedades físicas adaptáveis, excelente estabilidade química e alta biocompatibilidade. Devido a essas várias vantagens, os SMPs podem ter grande potencial para penetrar virtualmente em várias aplicações, como dispositivos biomédicos.

Especificamente, os SMPs termorresponsivos podem ter alto potencial como um novo material ortodôntico, do ponto de vista funcional e estético.

Juntamente com sua aparência relativamente transparente e esteticamente satisfatória, eles têm a vantagem sobre os materiais alinhadores convencionais por possuírem uma propriedade intrínseca de recuperação de forma. Assim, a aplicação de SMPs à ortodontia pode fornecer aos alinhadores forças consideráveis de recuperação da autoforma, o que pode facilitar sua operabilidade e funcionalidade. (Tarek M. Elshazly 2021).

Para superar as limitações do método convencional de fabricação por termoformagem a vácuo, foi desenvolvida a impressão 3D direta de alinhadores transparentes. Este estudo investigou as propriedades termomecânicas e viscoelásticas da resina fotocurável TC-85, um novo material para alinhadores impressos em 3D, comparando-a com o material termoplástico convencional polietileno tereftalato glicol (PETG).

Os resultados indicam que o TC-85 pode aplicar uma força leve e constante aos dentes quando usado em alinhadores transparentes impressos em 3D, devido à sua flexibilidade e propriedades viscoelásticas. Além disso, espera-se que a redução de força induzida pela inserção repetida dos alinhadores seja minimizada, mantendo uma força ortodôntica constante. Sua estabilidade geométrica em altas temperaturas e propriedades de memória de forma também representam vantagens para a aplicação clínica.

O estudo confirmou que a resina fotocurável TC-85, desenvolvida para impressão 3D de alinhadores, apresenta vantagens sobre o PETG convencional. Enquanto o PETG sofre redução significativa de espessura após a termoformagem, tornando difícil prever sua eficácia clínica, o TC-85 mantém uma espessura mais uniforme, possibilitando melhor controle da força ortodôntica aplicada.

A propriedade de memória de forma do TC-85 também é um diferencial importante. O PETG, após ser deformado, não retorna à sua forma original, enquanto o TC-85 demonstra alta taxa de recuperação, o que pode contribuir para um desempenho mais previsível dos alinhadores.
No geral, a impressão 3D de alinhadores com TC-85 pode melhorar a previsibilidade dos tratamentos ortodônticos ao reduzir variações de espessura, minimizar a perda de força ao longo do tempo e oferecer melhor memória de forma. (Lee. S.Y. 2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fluxo de trabalho para produção de alinhadores impressos em 3D mostrou-se superior ao método tradicional de termoformagem, eliminando etapas intermediárias (como a impressão de modelos em gesso) e reduzindo erros de adaptação.

A tecnologia CAD/CAM, associada a impressoras do tipo DLP (Digital Light Processing) e cura UV em atmosfera de nitrogênio, garantiu maior precisão geométrica e controle sobre espessuras personalizadas.

A resina TC-85DAC (Graphy) destacou-se como o único material atualmente aprovado por agências reguladoras, combinando biocompatibilidade, translucidez e propriedades mecânicas ideais. Sua composição fotopolimerizável e memória de forma permitiram a aplicação de forças ortodônticas constantes, com menor degradação em comparação ao PETG convencional.

Apesar das vantagens, os alinhadores impressos enfrentam desafios, como a necessidade de polimerização completa (para evitar toxicidade) e a dependência de softwares especializados para evitar falhas de impressão. Além disso, a escassez de estudos clínicos de longo prazo limita a validação de sua eficácia em más oclusões complexas.

A impressão 3D em consultório emergiu como uma alternativa viável, reduzindo custos, tempo de produção e impacto ambiental (eliminação de modelos de gesso). Plataformas como Deltaface e Maestro permitem customização detalhada, embora exijam investimento em equipamentos e treinamento.

Este trabalho demonstrou que a impressão 3D de alinhadores ortodônticos é uma tecnologia promissora, capaz de suprir limitações dos métodos convencionais. A integração de materiais inteligentes (como SMPs) e a democratização de impressoras DLP apontam para um futuro em que a ortodontia digital será mais acessível, previsível e sustentável. Contudo, a adoção em larga escala ainda depende de avanços técnicos e evidências científicas robustas.

5. REFERÊNCIAS

ALKHAMEES, Amani. **The new additive era of orthodontics: 3D-printed aligners and shape memory polymers—the latest trend—and their environmental implications.** *Journal of Orthodontic Science*, [S. l.], v. 13, eCollection 2024, 25 nov. 2024. DOI: https://doi.org/10.4103/jos.jos_211_23. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39758107/. Acesso em: 21 maio 2025.

BICHU, Yashodhan et al. **Advances in orthodontic clear aligner materials.** *Bioactive Materials*, [S. l.], v. 22, p. 384–403, 20 out. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.10.006. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36311049/. Acesso em: 21 maio 2025.

ISLAM, Atta et al. **Physiochemical and mechanical characterisation of orthodontic 3D printed aligner material made of shape memory polymers (4D aligner material).** *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, [S. l.], v. 150, p. 106337, fev. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106337. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38154364/. Acesso em: 21 maio 2025.

KAU, Chung et al. **Orthodontic aligners: current perspectives for the modern orthodontic office.** *Medicina*, Basel, v. 59, n. 10, p. 1773, out. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/medicina59101773. Disponível em: https://www.mdpi.com/1648-9144/59/10/1773. Acesso em: 21 maio 2025.

KOENIG, Nickolas et al. **Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners.** *Korean Journal of Orthodontics*, [S. l.], v. 52, n. 4, p. 249–257, 2022. DOI: https://doi.org/10.4041/kjod21.269. Disponível em: https://doi.org/10.4041/kjod21.269. Acesso em: 21 maio 2025.

LEE, Se Yeon et al. **Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners.** *Scientific Reports*, [S. l.], v. 12, p. 6246, 15 abr. 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-09831-4. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-022-09831-4. Acesso em: 21 maio 2025.

NARONGDEJ, Poom et al. **Advancements in clear aligner fabrication: a comprehensive review of direct-3D printing technologies.** *Polymers*, Basel, v. 16, n. 3, p. 371, 29 jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/polym16030371. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38337260/. Acesso em: 21 maio 2025.

PANAYI, Nearchos C. et al. **Directly Printed Aligner: Aligning with the future.** *Turkish Journal of Orthodontics*, Istambul, v. 36, n. 1, p. 62–69, 21 mar. 2023. DOI: https://doi.org/10.4274/TurkJOrthod.2023.2023.20. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36967616/. Acesso em: 21 maio 2025.

TARTAGLIA, Gianluca M. et al. **Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities.** *Materials*, Basel, v. 14, n. 7, p. 1799, 5 abr. 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14071799. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33916462/. Acesso em: 21 maio 2025.