



**UNIVERSIDADE
FERNANDO
PESSOA**

O TRATAMENTO DA CÁRIE DENTÁRIA COM LASER FEMTOSEGUNDO : O FUTURO DA DENTISTICA MINIMAMENTE INVASIVA ? - REVISÃO SISTEMÁTICA

[Femtosecond laser treatment of dental caries : the future of minimally invasive dentistry ? - Systematic review]

Dissertação de Mestrado

Mestrado integrado em Medicina Dentária

Hugo Senal

Orientador:

Doutor António Lobo Ribeiro

Junho 2024

**O TRATAMENTO DA CÁRIE DENTÁRIA COM LASER
FEMTOSEGUNDO : O FUTURO DA DENTISTICA
MINIMAMENTE INVASIVA ? - REVISÃO SISTEMÁTICA**

[Femtosecond laser treatment of dental caries : the future of minimally invasive dentistry ? - Systematic review]

Dissertação de Mestrado

Mestrado integrado em Medicina Dentária

Hugo Senal

Orientador:

Doutor António Lobo Ribeiro

Junho 2024

- À ma maman, Patricia, elle qui m'a tout appris, ma source d'inspiration. Aux valeurs inestimables que tu m'as inculquées et à ton soutien sans faille dans la poursuite de mes rêves. Je sais que tu aurais tant aimé suivre mon parcours si cela avait été possible et c'est en ton honneur que je réalise notre rêve commun. Merci pour tout maman.
- À mon papa, Patrick, mon roc, mon pilier inébranlable. Ton amour, ta force et ton soutien m'ont guidé dans chaque étape de ma vie. Tu occupes une place unique et irremplaçable dans mon cœur et sois assuré que je serai toujours présent pour toi, comme tu l'as été pour moi. Je t'aime plus que tous les mots ne sauraient le dire, papa.
- À ma regrettée tatie Corinne. Malgré les années passées sans toi, tu demeures la lumière qui éclaire mon chemin dans mes moments les plus sombres et je sais que tu veilles sur moi. À toi, ma seconde maman, je souhaite ici te dédier, non seulement cette thèse, mais aussi ma vie.
- À minha mãe, Patrícia, que me ensinou tudo e que é a minha fonte de inspiração. Aos valores inestimáveis que me inculcou e ao seu apoio incondicional na prossecução dos meus sonhos. Sei que terias gostado de seguir o meu caminho, se tivesse sido possível, e é em tua honra que estou a realizar o nosso sonho comum. Obrigada por tudo, mãe.
- Ao meu pai, Patrick, a minha fortaleza, o meu pilar inabalável. O teu amor, força e apoio guiaram-me em todas as fases da minha vida. Ocupas um lugar único e insubstituível no meu coração e podes ter a certeza de que estarei sempre ao teu lado, tal como tu estiveste para mim. Amo-te mais do que as palavras podem dizer, pai.
- À minha falecida tia Corinne. Apesar dos anos que passei sem ti, continuas a ser a luz que ilumina o meu caminho nos momentos mais sombrios e sei que estás a olhar por mim. A ti, minha segunda mãe, dedico não só esta tese, mas também a minha vida.

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador Professor António Lobo Ribeiro, por toda a sua ajuda, disponibilidade e a excelência dos seus conselhos durante a elaboração deste trabalho.
- A minha namorada Maïlys, pelo seu amor, a sua paciência e toda a força que me transmite diariamente. És o meu porto de abrigo onde encontro paz e felicidade.
- Aos meus avós Michel, Jacqueline e Yvonne, minhas primas Marie-Salomé e Camille, o meu padrinho Jean-François e toda a minha família pelo seu amor, apoio e as valores transmitidos ao longo da minha vida. Vocês são os meus pontos de referência e amo-vos com um amor profundo.
- Adrien e Louis, agradeço-vos por serem os melhores amigos que conheci no Porto, nós os três começámos esta maravilhosa viagem juntos e vamos terminá-la juntos.
- A ti, Niagara, a minha professora de português que se tornou, mais do que uma amiga, uma verdadeira irmã.
- À minha amiga Amélie, minha confidente e melhor amiga, obrigado por estares sempre presente para mim.
- Ao meu binómio de clínica, Rémi, obrigado por todas as horas de trabalho sério, mas sempre com um toque de leveza e sentido de humor, que tornaram a nossa experiência de aprendizagem fluida e agradável.
- Aos meus amigos do Porto : Thomas, Juliette, Lauriane, Marie, Alix, Enzo, Lelio, Louise, Quentin, Sarah, Léa D., Alexia, Eva, Léa S e Alessandro. Nunca esquecerei todos os momentos que partilhámos.
- Aos meus amigos de infância, que sempre me apoiaram no meu percurso de vida.
- À Turma 2, por todos os momentos partilhados, não só na clínica, mas também fora dela, e pelo incrível intercâmbio entre estudantes de diferentes origens.

RESUMO

Objetivo : O desenvolvimento do laser de femtosegundo nas últimas décadas permitiu a sua aplicação em várias áreas da saúde. Com elevada irradiância na ordem de 10^8 – 10^{11} W/cm² e com uma duração dos impulsos laser na ordem de 10^{-15} segundos, este dispositivo laser permite-nos pensar que podemos executar uma rápida ablação dos tecidos dentários, com efeitos secundários mínimos.

O objetivo desta revisão sistemática é de responder às questões: A utilização do laser de femtosegundo na preparação de cavidades dentárias pode representar um projeto promissor para o futuro? Quais são as alterações morfológicas causadas nos dentes durante a preparação com laser de femtosegundo? E quais são os parâmetros do laser que influenciam a qualidade do preparo dentário?

Metodologia : Na elaboração desta revisão sistemática, foi desenvolvida uma pesquisa bibliográfica em 3 bases de dados: Pubmed, LILACS e Science Direct. As pesquisas foram feitas entre os dias 08 e 29 de janeiro de 2024. Com a utilização de operadores booleanos, e as palavras-chave permitiram encontrar ensaios clínicos e estudos *in vitro* que foram selecionados segundo critérios de inclusão e exclusão.

Resultados : Foram encontrados 900 artigos após a pesquisa direta, o que resultou em 236 artigos para leitura do resumo. Em 46 artigos em textos integrais estudados, 15 foram selecionados para a elaboração desta revisão sistemática após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão .

Conclusão : Os estudos *in vitro* mostraram que o laser femtosegundo representa uma alternativa viável ao tratamento da cárie dentária com uma broca de turbina, é mais preciso e permite a realização de cavidade nítidas, sem danos colaterais. Vários estudos complementares serão necessários para observar o laser em condições *in vivo* e o melhorar de modo a poder substituir as técnicas convencionais de tratamento.

Palavras-chave : « dente » ; « esmalte » ; « dentina » ; « cavidade dentária » ; « laser femtosegundo »

ABSTRACT

Objective : The development of the femtosecond laser in recent decades has allowed its application in several areas of healthcare. With a high irradiance of the order of 10^8 – 10^{11} W/cm² and a laser pulse duration of the order of 10-15 seconds, this laser device allows us to believe that we can perform a rapid ablation of dental tissues, with minimal side effects.

The aim of this systematic review is to answer the questions: Could the use of the femtosecond laser in the preparation of dental cavities represent a promising project for the future? What morphological changes are caused in teeth during femtosecond laser preparation? And which laser parameters influence the quality of the tooth preparation?

Methodology: In preparing this systematic review, a bibliographic search was carried out in 3 databases: Pubmed, LILACS and Science Direct. The searches were carried out between January 8th and 29th, 2024. Using Boolean operators and keywords, it was possible to find clinical trials and *in vitro* studies that were selected according to inclusion and exclusion criteria.

Results: After a direct search, 900 articles were found, resulting in 236 articles for abstract reading. Of the 46 full-text articles studied, 15 were selected for this systematic review after the application of inclusion and exclusion criteria.

Conclusion : *In vitro* studies have shown that the femtosecond laser represents a viable alternative to the treatment of dental caries with a turbine drill, it is more precise and allows the realisation of clear cavities without collateral damage. Several additional studies will be needed to observe the laser under *in vivo* conditions and improve it so that it can replace conventional treatment techniques.

key-words : « tooth » ; « enamel » , « dentin » ; « dental cavity » ; « femtosecond laser »

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE QUADRO	xix
ÍNDICE DE TABELAS	xxi
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1. Topologia da revisão da literatura	5
2.2. Estratégia de revisão da literatura	5
2.3. Critérios de elegibilidade	6
2.4. Seleção dos artigos	7
2.5. Avaliação do risco de viés	8
3. RESULTADOS	11
4. DISCUSSÃO	43
5. CONCLUSÃO	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Diagrama de fluxo PRISMA</i>	7
---	---

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - <i>Estratégia PICO (População, Intervenção, Comparação, Outcome) com objetivo de elaborar a questão clínica</i>	5
---	----------

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - <i>Resultados da estratégia de pesquisa de artigos</i>	6
Tabela 2 - <i>Avaliação metodológica dos ensaios in vitro de acordo com a ferramenta de avaliação Quality Assessment Tool For In Vitro Studies</i>	8
Tabela 3 – <i>Resumo dos artigos selecionados</i>	11
Tabela 4 – <i>Parâmetros aconselhados na utilização do laser femtosegundo</i>	48

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ANOVA -	Analysis of variance
Ca -	Cálcio
CO₂ -	Dióxido de carbono
CW -	Continuous wave
EDX -	Energy dispersive X-ray
Er -	Erbium
fs -	Femtosecond
FTIR -	Fourier transform infrared spectroscopy
IV -	Infravermelho
KGW -	Potassium gadolinium tungstate
KYW -	Potassium yttrium tungstate
MEV -	Microscópio Eletrónico de Varrimento
MO -	Microscópio Ótico
Nd -	Neodymium
OCT -	Tomografia óptica coerente
PICO -	População, Intervenção, Comparação, <i>Outcome</i>
Po -	Phosphate
PRISMA -	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
QUIN -	Quality Assessment Tool For In Vitro Studies
Ti:Sapphire -	Titanium/Sapphire
UV -	Ultravioleta
YAG -	Yttrium aluminium garnet
Yb -	Ytterbium

1. INTRODUÇÃO

A odontologia está atualmente sujeita a uma exigência acelerada e crescente, impulsionada pela alta prevalência de doenças bucais devido a uma dieta rica em açúcar, a uma higiene oral deficiente, e também devido à reduzida educação dentária numa grande parte da população. As cáries dentárias não tratadas, a periodontite severa e a perda de dentes estão entre as dez condições mais prevalentes, afetando globalmente mais de 3,5 mil milhões de pessoas em 2017 (Rapp et al., 2022).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde, 60-90% das crianças em idade escolar e quase 100% dos adultos em todo o mundo têm cáries dentárias que levam à dor e ao desconforto (Petrov et al., 2018). Sendo a cárie dentária uma das doenças mais comuns, causando um verdadeiro problema de saúde pública, faz todo o sentido estudar as soluções técnicas disponíveis para que o seu tratamento seja o mais eficaz e o menos restritivo, tanto para o paciente como para o médico dentista.

Regra geral, para tratar as lesões de cáries, existem dois métodos para a remoção de tecidos duros dentários.

O primeiro método, tradicionalmente utilizado há décadas, envolve o uso de turbina e de brocas rotativas que podem atingir velocidades até 400 000 rotações por minuto, e que são usadas para remover os tecidos cariados. Este método, muitas vezes, requer o uso de anestesia local e tem associado vibrações mecânicas e ruído intenso, que podem ser desconfortáveis para o paciente e causar ansiedade neste. Além disso, a utilização de brocas de alta velocidade gera calor excessivo no tecido dentário, resultando em danos térmicos, as vezes irreversíveis, aos tecidos circundantes e particularmente à polpa dentária que pode necrosar.

O segundo método que podemos encontrar numa clínica dentária para tratar as cáries, utiliza lasers dentários para a remoção de tecidos duros afetados. Desde a invenção do primeiro laser comercial por Ted Maiman em 1960, muitas aplicações dos laser têm sido estudadas, entre as quais a cirurgia da retina e a cirurgia dentária a laser (Le et al., 2016).

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Entre a variedade de tipos de laser que existem, os lasers mais utilizados em cirurgia dentária são: o laser de CO₂ (isto é, o meio activo do laser é composto de gás de dióxido de carbono), laser de Nd:YAG (meio activo: cristal de granada de ítrio-alumínio dopada com neodímio), laser de Er:YAG (meio activo: cristal de granada de ítrio-alumínio dopada com érbio) e o laser de Er,Cr:YSGG (meio activo: cristal de granada de ítrio, escândio, gálio e cromo sensibilizado) (Liu et al., 2014).

Os lasers CO₂ (com comprimento de onda de emissão de 10600 nm) e de Nd:YAG (com comprimento de onda de emissão de 1064 nm) operam geralmente em modo contínuo (usualmente designado como: modo CW) e provocam danos térmicos óbvios como vitrificação, fusão e vaporização. Portanto, eles são reservados para a cirurgia de tecidos moles e de canais dentários. Entretanto, os lasers Er:YAG (com comprimento de onda de emissão de 2940 nm) e Er,Cr:YSGG (com comprimento de onda de emissão de 2780 nm) são utilizados para a ablação de tecidos duros, mas baseiam-se num processo fotomecânico de micro-explosão que pode quebra a estrutura de hidroxiapatita e levar a uma aparência indesejada, como micro-fissuras, fragmentos, carbonização, fusão e recristalização.

Os dois métodos geram tensões mecânicas e térmicas, que podem levar à formação de micro-fissuras no esmalte e na dentina. Estes efeitos termo-mecânicos podem originar potencialmente novas locais de iniciação para ataques bacterianos e químicos, levando a lesões cariosas, e devem ser evitados para o sucesso a longo prazo do tratamento dentário.

Entretanto, com o avanço tecnológico na medicina dentária, a abordagem à odontologia conservadora tem sido cada vez mais valorizada. Este método clínico destaca a preservação máxima do tecido dentário saudável, removendo apenas as regiões afetadas pela cárie. Ao priorizar a conservação dos dentes naturais, a dentística minimamente invasiva não só diminui a necessidade de procedimentos invasivos, mas também promove a saúde bucal a longo prazo, reduzindo as complicações futuras.

Perante estes desafios, a utilização do laser de femtosegundo surge como uma alternativa promissora para o tratamento das cáries dentárias. Diferente dos lasers convencionais, o laser de femtosegundo opera em escalas de tempo ultracurtas, o que minimiza a acumulação de calor e reduz o risco de danos aos tecidos circundantes.

Além disso, a sua capacidade em realizar cortes precisos e controlados sem contacto físico com o dente torna-o uma opção altamente segura e confortável para os pacientes. Estes lasers dentários oferecem várias vantagens, incluindo redução da dor e desconforto, maior precisão e não requerem, à partida, refrigeração por água no local de tratamento. Além disso, o laser femtosegundo pode ser utilizados sem anestesia local na maior parte dos casos, o que pode ser preferível para alguns pacientes, nomeadamente os pediátricos.

Nesta revisão sistemática, exploramos a viabilidade e as vantagens do uso do laser de femtosegundo no tratamento dos dentes e na preparação de cavidades dentárias. Analisaremos os estudos existentes para avaliar a sua eficácia, e segurança em comparação às técnicas convencionais baseadas em turbina+brocas. O presente trabalho tem como objetivo responder às seguintes questões: “A utilização do laser de femtosegundo na preparação de cavidades dentárias pode representar um projeto promissor para o futuro? Quais são as alterações morfológicas causadas nos dentes durante a preparação com laser de femtosegundo? E quais são os parâmetros do laser que influenciam a qualidade do preparo dentário?”

Espera-se que esta revisão contribua para uma melhor compreensão do papel do laser de femtosegundo na odontologia moderna e o seu impacto na melhoria da experiência do paciente e do médico dentista durante o tratamento das cáries.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Topologia da revisão da literatura

De forma a elaborar a questão clínica para à qual o presente trabalho de revisão sistemática tentará responder, utilizámos uma topologia de pesquisa baseada na estratégia PICO (População, Intervenção, Comparação, *Outcome*). O resultado está disponível para a consulta no quadro 1.

Quadro 1 - *Estratégia PICO (População, Intervenção, Comparação, Outcome) com objetivo de elaborar a questão clínica.*

Critério	Avaliação
População (P)	Dentes humanos extraídos
Intervenção (I)	Preparação de cavidade dentária com laser femtosegundo
Comparação (C)	Dentes não tratados ou tratados com técnicas convencionais com turbina ou outros lasers que não o de femtosegundo
Outcome (O)	Eficácia, capacidade e precisão da ablação dos tecidos duros. Vantagens e complicações do tratamento com laser femtosegundo, segurança e preservação de tecido saudável

2.2. Estratégia de revisão da literatura

Realizou-se a pesquisa de artigos entre o dia 08 de Janeiro e o dia 29 de Janeiro de 2024 nas bases de dados seguintes: *Pubmed* (Medline), *LILACS* e *Science Direct*.

Durante a pesquisa, utilizámos vários termos MeSH (*Medical Subject Headings*) que foram eles mesmos combinados e associados através da utilização do operador booleano *AND*. As palavras-chave em inglês, selecionadas como termos MeSH são as seguintes : *femtosecond laser, enamel, dentin, dental cavity*.

Na pesquisa, foram procurados artigos em idioma inglês ou português, publicados entre os anos de 2000 e 2024. Os resultados da estratégia de pesquisa são apresentados na tabela 1.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Tabela 1 - Resultados da estratégia de pesquisa de artigos.

Pesquisa efetuada	Número de artigos encontrados	N.º total
<i>Femtosecond Laser AND enamel</i>	Pubmed → 24 LILACS → 35 Science Direct → 222	281
<i>Femtosecond Laser AND dentin</i>	Pubmed → 25 LILACS → 38 Science Direct → 128	191
<i>Femtosecond Laser AND enamel AND dentin</i>	Pubmed → 14 LILACS → 23 Science Direct → 91	128
<i>Femtosecond Laser AND dental cavity</i>	Pubmed → 0 LILACS → 19 Science Direct → 281	300
		900

2.3. Critérios de elegibilidade

Para a seleção dos artigos científicos, foram estabelecidos os critérios de inclusão e exclusão.

Os critérios de inclusão foram os seguintes:

- artigos sobre a utilização de laser femtosegundo para a ablação de tecido dentário
- estudos *in vitro* em dentes humanos

Os critérios de exclusão foram os seguintes:

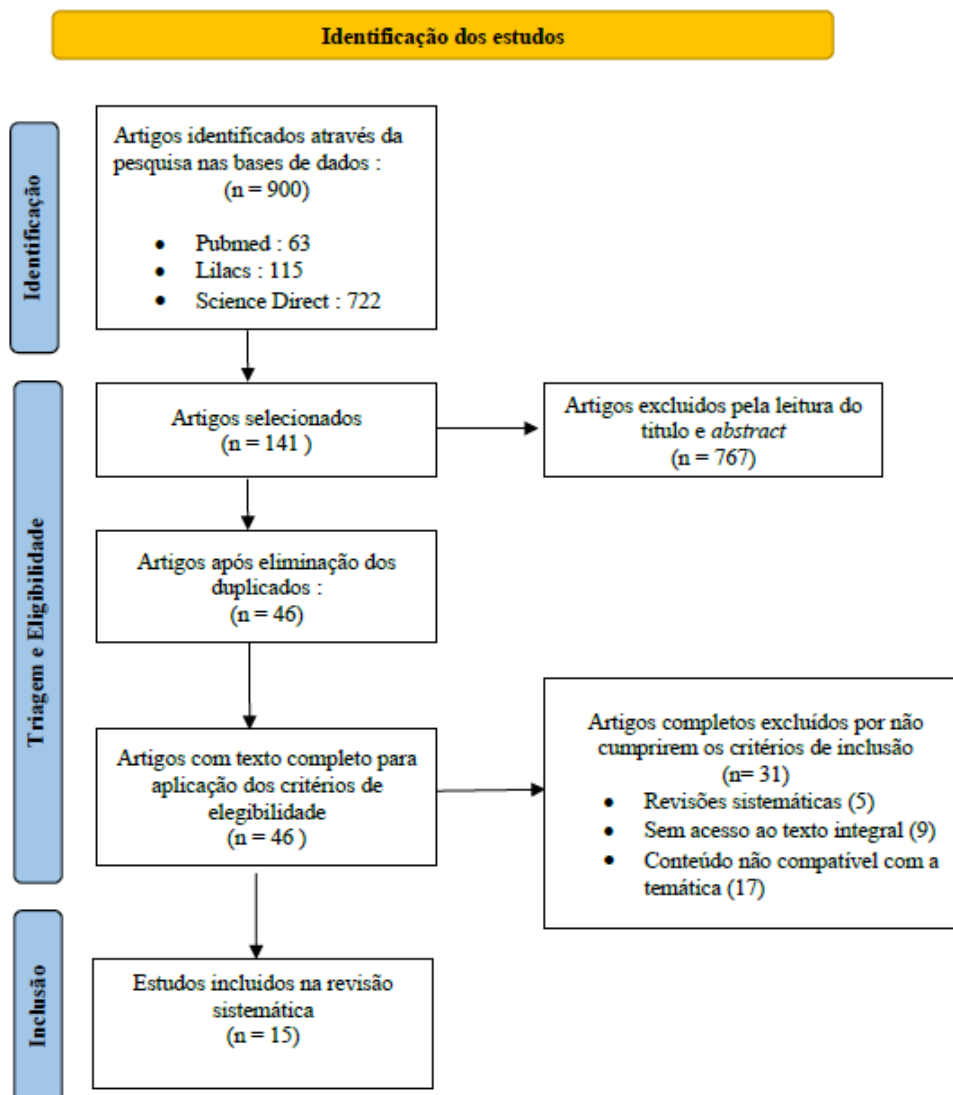
- artigos duplicados
- artigos que não cumprem os critérios de elegibilidade
- estudos não suficientemente claros e explicitados
- artigos escritos noutra língua do que o inglês ou português.

2.4. Seleção dos artigos

Uma vez estabelecidos os critérios de inclusão e exclusão nos artigos pesquisados, entramos na fase de seleção e de leitura dos respectivos resumos. Dos 900 artigos encontrados, 236 foram selecionados com base no título do artigo, e após uma segunda triagem por leitura do respectivo resumo, 141 artigos foram escolhidos. Com a remoção dos duplicados, foram indicados 46 artigos para a leitura integral. Destes artigos foram selecionados, 15 artigos para elaboração do presente trabalho de revisão sistemática.

Esta metodologia de seleção está apresentada na figura 1. que representa o diagrama de fluxo PRISMA usado.

Figura 1 – Diagrama de fluxo PRISMA



O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

2.5. Avaliação do risco de viés

Foi imprescindível avaliar a qualidade metodológica dos artigos selecionados de forma a diminuir ao máximo os riscos de viés. Desta maneira, a qualidade metodológica dos ensaios *in vitro* foi avaliada com recurso à ferramenta QUIN (*Quality Assessment Tool For In Vitro Studies*) (Sheth et al., 2022). Esta ferramenta é eficiente, eficaz e útil para avaliar o risco de viés e, por conseguinte, a qualidade dos estudos *in vitro* selecionados. Baseia-se nas respostas a 12 perguntas com uma pontuação entre 0 e 2 em função da resposta: “não aplicável” (NA), “não especificado” (0), “inadequadamente especificado” (1), “adequadamente especificado” (2). Através do cálculo da pontuação total sob forma de percentagem, podemos concluir se o ensaio *in vitro* é de alto (<50%), médio (50-70%) ou baixo risco de viés (>70%).

O cálculo a efetuar foi o seguinte:

$$\text{Pontuação final} = \frac{\text{pontuação total} \times 100}{2 \times \text{número de critérios aplicáveis}}$$

O resultado da avaliação metodológica está apresentado na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Avaliação metodológica dos ensaios *in vitro* de acordo com a ferramenta de avaliação *Quality Assessment Tool For In Vitro Studies (QUIN)* (Sheth et al., 2022)

Autor e Ano	Critérios												total
	nº1	nº2	nº3	nº4	nº5	nº6	nº7	nº8	nº9	nº10	nº11	nº12	
Liu et al. (2014)	2	0	1	2	2	0	1	2	0	0	2	2	14
Luengo et al. (2013)	2	0	1	2	2	0	0	2	0	0	2	2	13
Petrov et al. (2018)	2	0	1	2	2	0	0	2	0	0	2	2	13
Rapp et al. (2022)	2	0	1	2	2	0	0	2	0	0	2	2	13
Chen et al. (2016)	2	0	1	1	2	0	0	2	0	0	2	2	12
Zong et al. (2022)	2	0	2	2	2	0	0	2	0	0	2	2	14
Nicolodelliet al. (2012)	2	0	1	1	2	0	0	2	0	0	2	2	12
Le et al. (2017)	2	0	1	1	2	0	0	2	0	0	2	2	12
Rego Filho et al. (2013)	2	0	2	2	2	0	1	2	0	0	2	2	15
Rapp et al. (2023)	2	0	2	1	2	0	0	2	0	0	2	2	13
Muñoz et al. (2012)	2	0	2	2	2	0	1	2	0	0	2	2	15
Daskalovaet al. (2010)	2	0	2	1	2	0	0	2	0	0	2	2	13
Hikov et al. (2017)	2	0	1	1	2	0	0	2	0	0	2	2	12
Yuan et al. (2017)	2	0	2	2	2	0	0	2	0	0	2	2	14
Le et al. (2016)	2	0	2	2	2	0	1	2	0	0	2	2	15

Legenda :
NA → Não Aplicável ; **0** → Não especificado ;
1 → Inadequadamente especificado ; **2** → Adequadamente especificado

Deste modo, podemos classificar os artigos seleccionados no presente trabalho de revisão sistemática como de moderado risco de viés. Isto explica-se pela pontuação desfavorável nos critérios 2, 6, 9 e 10. De facto, os autores dos artigos não especificaram o método de cálculo da amostra, o número, o treino e a prática, a calibração, e a confiabilidade inter- e intra-avaliadores. Também, não detalharam o recurso a uma avaliação cega ou duplamente cega dos resultados dos estudos realizados.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

3. RESULTADOS

Tal como estipulado na secção de material e métodos, foram incluídos neste trabalho 15 artigos após leitura completa e aplicação dos critérios de inclusão e exclusão. Estes artigos são da mesma tipologia, são todos estudos *in vitro* que avaliam os efeitos do laser femtosegundo, quer seja a eficiência, o aumento da temperatura intrapulpar, as variações de estrutura ou a rugosidade dos dentes preparados com esta técnica. A análise das características e dos resultados dos estudos seleccionados encontra-se na tabela 3 abaixo.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Tabela 3 – Resumo dos artigos selecionados

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/Outcome
Liu et al. (2014)	China	Estudo <i>in vitro</i>	12 pré-molares extraídos, cortados em fatias de dentina de 1,5mm de espessura.	Avaliação da morfologia e rugosidade da superfície dentinária tratada.	Laser: Yb:KYW (1025 nm, 400 fs, 100 kHz, até 4 W) Estudo da morfologia com um MEV Estudo da rugosidade com um Microscópio Confocal. Comparação com preparos realizados com turbina.	O aumento da fluência reduz a rugosidade da superfície do dente. A utilização do laser fs com baixa fluência, alta velocidade de varrimento e um grande espaçamento entre as linhas de varrimento aumentam a rugosidade do preparo cavitário. Isto permite aumentar a molhabilidade da superfície e consequentemente a adesão do dente ao material restaurador.
Luengo et al. (2013)	Espanha	Estudo <i>in vitro</i>	12 terceiros molares extraídos, cortados em fatias de esmalte de 1mm de espessura.	Avaliação da micromorfologia da superfície tratada.	Laser: Ti:Sapphire (793 nm, 120 fs, 1 kHz, 1 W) Estudo da superfície com Microscópio ótico e MEV. Comparação com preparos realizados com turbina.	O aumento da energia e a diminuição da velocidade de varrimento aumentam a ablação. Em comparação com a turbina, o laser presente uma ablação 10 vezes mais precisa, sem qualquer sinal de aumento da temperatura dos tecidos e de danos colaterais. Não há necessidade de irrigação e de anestesia porque a calor não pode propagar-se. O único inconveniente é a presença de detritos no fundo do preparo que não podem ser removidos sem o uso de ultrassons.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Petrov et al. (2018)	Reino Unido	Estudo <i>in vitro</i>	Molares extraídos, cortados em fatias de 2 mm de espessura.	Avaliação da morfologia da superfície tratada, da alteração da temperatura e da composição química.	<p>Laser: Yb:KGW (1030 nm, 310 fs, 500 kHz, até 5 W)</p> <p>Medição da temperatura com termopares.</p> <p>Avaliação da superfície com MO e MEV.</p> <p>Avaliação da alteração de composição química com FTIR e espectrómetro EDX.</p>	<p>O estudo da temperatura mostra um aumento estável de 5 °C, que não vai causar danos colaterais.</p> <p>A análise em MO mostra uma ablação homogénea com ausência de fissuras e este resultado está confirmado com o MEV. Não há sinais de descoloração, fusão e carbonização.</p> <p>A espectroscopia não mostra mudança de composição química na dentina. Há um aumento do Oxigénio e diminuição do Carbono no esmalte. Não há mudança das concentrações e da proporção Ca:P no dente.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/Outcome
Rapp et al. (2022)	Austrália	Estudo <i>in vitro</i>	Dentes extraídos por motivo ortodontico. Utilizados inteiros ou seccionados de maneira horizontal	Avaliação do limiar de ablação, dos parâmetros necessários para obter uma ablação otimizada. Observação da mudança de composição química e de temperatura	<p>Laser: <i>Carbide 40W fs-Laser</i> (1029 nm, 275 fs, 100 kHz, 400 μJ)</p> <p>Medição da temperatura com termopares</p> <p>Avaliação da superfície com MO e MEV.</p> <p>Avaliação da alteração de composição química com <i>Renishaw InVia Reflex Raman spectrometer</i>.</p>	<p>O limiar de ablação do esmalte é de 1,1 J/cm² e de 0,6 J/cm² para a dentina.</p> <p>No esmalte, a ablação ótima está encontrada com uma fluência de 6,11 J/cm² o que nos dá uma eficiência de ablação de 0,93 mm³/min/W. Na dentina, a ablação ótima está encontrada com uma fluência de 2,45 J/cm² o que nos dá uma eficiência de ablação de 2,20 mm³/min/W.</p> <p>Em MO e MEV, observamos preparos cavitários nítidos, sem fissuras nem danos colaterais.</p> <p>A espectrometria não mostra nenhuma mudança química nem danos nas fases minerais e orgânicas no esmalte e na dentina.</p> <p>O aumento máxima da temperatura está medido para um tratamento de 3 minutos e 25 segundos e representa um aumento de 5,5 °C o que se encontra dentro dos limites aceitáveis.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Chen et al. (2016)	China	Estudo <i>in vitro</i>	Coroas de primeiros molares extraídos, cortados em fatias de 1,5mm de espessura no sentido longitudinal.	Avaliação da eficiência de ablação e dos fatores associados: fluência, profundidade de ablação e velocidade de varrimento.	<p>Laser: <i>diode pumped fs-Laser</i> (1025 nm, 400 fs, 30-200 kHz, 0-4 W)</p> <p>Avaliação do volume de ablação com um Microscópio Confocal.</p>	<p>A ablação aumenta com o aumento da fluência até um limite. Uma vez ultrapassado, esta ablação diminui.</p> <p>No esmalte, a eficiência de ablação máxima é de $0,014 \pm 0,0001 \text{ mm}^3/\text{J}$ com uma fluência de 6,25 J/cm^2 e 200 camadas de ablação.</p> <p>Na dentina, a eficiência de ablação máxima é de $0,0177 \pm 0,0003 \text{ mm}^3/\text{J}$ com uma fluência de 4,69 J/cm^2 e 400 camadas de ablação.</p> <p>Se a distância entre as linhas de varrimento do laser é inferior ao diâmetro do ponto do laser, obtemos uma superfície homogênea e plana.</p> <p>O aumento da profundidade de ablação diminui a eficiência de ablação porque o ponto foco de laser se afasta da superfície a tratar.</p> <p>Para ter uma boa eficiência, precisamos de uma fluência razoável, de uma sobreposição entre as linhas de ablação e de um foco correto.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/Outcome
Zong et al. (2022)	China	Estudo <i>in vitro</i>	Coroas de terceiros molares, cortadas em fatias de 2 mm de espessura, de maneira perpendicular ao eixo do dente.	Estudo dos fatores relacionados à inclinação da parede axial do preparo cavitário: fluência, espaçamento das linhas de varrimento e número de camadas de ablação.	<p>Laser: <i>Solid state fs-Laser</i> (1025 nm, 400 fs, 30-200 kHz, 0-4 W)</p> <p>Avaliação da inclinação da parede axial do preparo cavitário com Microscópio Confocal.</p>	<p>A inclinação da parede axial do preparo cavitário diminui com o aumento da fluência. Obtemos uma inclinação ótima de $38,71 \pm 0,46^\circ$ para o esmalte e $20,53 \pm 0,28^\circ$ para a dentina com uma fluência de $6,25 \text{ J/cm}^2$.</p> <p>O espaçamento das linhas de varrimento não modifica a inclinação, tem pouco efeito.</p> <p>O aumento do número de camadas de ablação aumenta a profundidade de ablação, mas diminui a inclinação da parede axial. Com 300 camadas, obtemos uma inclinação ótima de $36,62 \pm 0,73^\circ$ para o esmalte e de $23,12 \pm 0,88^\circ$ para a dentina.</p>
Nicolodelli et al. (2012)	Brasil	Estudo <i>in vitro</i>	6 coroas de terceiros molares extraídos por motivo ortodôntico e um fêmur de bovino cortado em 6 peças de $10 \times 5 \times 2 \text{ mm}$.	Avaliação da influência do número de impulsos na estrutura morfológica dos dentes.	<p>Laser: Ti:Sapphire (801 nm, 70 fs, 10-100 kHz)</p> <p>Avaliação das variações morfológicas e do diâmetro das cavidades com MEV.</p>	<p>Ao variar o número de impulsos de 1 a 1000, observamos uma cavidade bem definida, sem danos colaterais nem redeposição do material eliminado, com uma parede axial bem preservada.</p> <p>Mesmo com um muitos impulsos, não há sinais de fissuras, de aumento da temperatura e os túbulos dentinários ficam preservados.</p> <p>Pode ser explicado pelo fato de o tempo entre os impulsos ser suficientemente longo para a energia se dissipar.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Le et al. (2017)	Portugal, França	Estudo <i>in vitro</i>	Terceiros molares extraídos, cortados em fatias de 1,5mm de espessura.	Avaliação da influência do arrefecimento externo durante o tratamento com o laser fs.	<p>Laser: Yb:KYW (1030 nm, 560 fs, 1 kHz)</p> <p>Fluência entre 2 e 14 J/cm².</p> <p>Sistema de arrefecimento com ar.</p> <p>Sistema de arrefecimento com água e ar.</p> <p>Avaliação da profundidade da cavidade com MO.</p> <p>Temperatura medida com um termopar.</p> <p>Avaliação da superfície tratada com MEV e espectrómetro FTIR.</p>	<p>O aumento da fluência aumenta a deposição de detritos que podem ser removidos com ultrassons. A utilização de arrefecimento com água diminui a deposição dos detritos.</p> <p>Não observamos variação na composição química, mesmo com uma fluência elevada.</p> <p>A utilização de arrefecimento externo não tem influência na taxa de ablação.</p> <p>Com uma fluência de 14 J/cm² e sem arrefecimento, observamos um aumento da temperatura de 17,5 °C. Com arrefecimento com água e ar, a variação de temperatura é reduzida de 9 °C.</p> <p>Utilização de arrefecimento com água e ar é obrigatória para evitar risco de danos pulpare e desidratação da dentina. Arrefecimento com ar insuficiente.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Rego Filho et al. (2013)	Brasil	Estudo <i>in vitro</i>	30 pré-molares extraídos por motivo ortodôntico.	<p>Avaliação da influência do estado de hidratação do dente durante a ablação.</p> <p>Avaliação do limiar de ablação, da superfície do dente tratado, do diâmetro da cavidade, em função do estado da hidratação do dente.</p>	<p>Laser: Ti:Sapphire (801 nm, 70 fs, 1 kHz)</p> <p>Avaliação do diâmetro das cavidades obtidas com MEV.</p>	<p>O tempo de irradiação e a fluência não alteram o diâmetro da cavidade.</p> <p>A potência aumenta o diâmetro da cavidade</p> <p>Com uma alta potência (670W) a dentina apresenta danos causados pela acumulação de calor. Observamos o mesmo fenômeno quando um grande número de impulsos está aplicado na dentina.</p> <p>Com o aumento da desidratação, observamos um aumento da presença de fissuras, em particular na dentina.</p> <p>O limiar de ablação do esmalte e da dentina aumenta com a desidratação.</p> <p>A água contida no dente tem um papel de regulador da tensão e minimiza o stress mecânico local. Ela absorve o calor acumulado e dissipa-o sob forma de vapor.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Rapp et al. (2023)	Austrália	Estudo <i>in vitro</i>	Dentes extraídos por motivo ortodôntico, com polpa removida.	<p>Avaliação do efeito do comprimento de onda sobre a ablação da dentina e do esmalte.</p> <p>Estudo da taxa de ablação, da eficiência e da variação da temperatura intrapulpar em função do comprimento de onda do laser (UV, verde, IV).</p>	<p>Laser: <i>Carbide 40W fs-Laser</i> (1030/515/343nm, 275fs, 100kHz, até 400µJ)</p> <p>Avaliação do limiar de ablação, da taxa e da eficiência de ablação como MO e um profilômetro.</p> <p>Avaliação das variações químicas com <i>InVia Reflex Raman spectrometer</i>.</p> <p>Avaliação da variação de temperatura com um termopar dentro da câmara pulpar dos dentes.</p>	<p>O limiar de ablação da dentina é sempre menor do que o limiar de ablação do esmalte.</p> <p>Em UV, observamos o limiar de ablação o mais baixo, mas a utilização desse comprimento de onda causa danos importantes.</p> <p>A eficiência de ablação é similar com a utilização de IV e ondas verdes. A eficiência de ablação da dentina em relação à do esmalte é duas vezes mais importante em IV e 4,5 vezes mais importante para as ondas verdes.</p> <p>Em espectrometria e microscopia, não observamos nenhuma modificação de estrutura com a utilização de IV.</p> <p>Com as ondas verdes de fluência superior a 10 J/cm², observamos modificações de estruturas. Mas esta fluência encontra-se bem acima da fluência ótima (7 J/cm² para o esmalte e 2 J/cm² para a dentina).</p> <p>Em IR e verde, o aumento da temperatura é mínima com uma fluência de 3,0 J/cm² e um <i>overlap</i> até 50%. Com uma fluência e um <i>overlap</i> mais importante, há um grande risco de causar danos.</p> <p>O arrefecimento com ar permite reduzir de maneira eficaz o aumento da temperatura.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
 revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
						<p>É muito importante escolher os bons parâmetros do laser, as ondas UV devem ser evitadas, as IR e verdes têm melhores resultados.</p> <p>As ondas verdes são muito úteis para a ablação da dentina, mas temos de controlar a fluência e overlap à passagem do esmalte para a dentina.</p> <p>As ondas IR mostram uma ablação do esmalte e da dentina similar o que simplifica a estratégia de controlo da ablação.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Muñoz et al. (2012)	Espanha	Estudo <i>in vitro</i>	6 terceiros molares extraídos por motivo ortodontico, cortados em fatias de 1 mm de espessura, no sentido vestibulo-lingual.	<p>Avaliação das alterações morfológicas da dentina após tratamento com turbina e com laser femtosegundo.</p> <p>Avaliação dos efeitos de vários parâmetros do laser: velocidade de varrimento, espaçamento das ondas e energia.</p>	<p>Laser: Ti:Sapphire (795 nm, 100 fs, 80 MHz)</p> <p>Turbina de 450 000 rotações por minuto com broca redonda de 0,5 mm.</p> <p>Análise do diâmetro e da profundidade dos preparos com MO.</p> <p>Comparação das amostras com MEV</p>	<p>A preparação mecânica com turbina apresenta uma superfície plana, com microfissuras, com evidências de fusão e carbonização, e presença de smear layer. Os túbulos dentinários encontram-se ocluídos.</p> <p>O laser permite obter um preparo rugoso, sem smear layer, com túbulos dentinários abertos e sem sinais de danos colaterais.</p> <p>A profundidade aumenta em função da energia. A velocidade de varrimento não modifica a morfologia do preparo.</p> <p>O aumento do espaçamento das ondas diminui a ablação da dentina.</p> <p>Observamos detritos no fundo da cavidade, que podem ser removidos com ultrassons.</p> <p>Em comparação com a turbina, o laser apresenta menos danos colaterais, preservação de dentina saudável, ausência de vibração, stress e necessidade de anestesia.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Daskalova et al. (2010)	Bulgária, Áustria	Estudo <i>in vitro</i>	Molares extraídos, cortados em discos de 1mm de espessura.	Avaliação da morfologia dos preparos com laser femtosegundo em superfície dentinária.	Laser : Ti:Sapphire (800 nm, 25 fs, 1kHz, 800mW) Observação da superfície dentinária com MEV e microscópio de força atômica.	Com a utilização do MEV, observamos um limiar de ablação de 1,5 J/cm ² . Entre 1,5 e 2 J/cm ² , os preparos são nítidos e limpos. Se ultrapassamos 2 J/cm ² e 600 impulsos, há presença de fissuras e danos térmicos. Ao aumentar as pulsações, causamos uma acumulação de energia, o que está na origem dos danos observados. O microscópio de força atômica não permite estudar o interior do preparo efetuado, mas só a área circundante. Este instrumento nos indica a presença de túbulos dentinários fechados à volta da cavidade devido à onda de choque provocada pelo laser. Pode diminuir a sensibilidade dentária e ser uma solução concreta a este problema em condições subablativas.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Hikov et al. (2017)	Francia, Bulgária	Estudo <i>in vitro</i>	Molares extraídos, cortados em fatias de 2mm de espessura	<p>Pesquisa dos parâmetros adequados para a preparação de cavidade em dentística minimamente invasiva.</p> <p>Avaliação do limiar de ablação e dos parâmetros de ablação ótica.</p> <p>Avaliação da rugosidade e da variação de composição química.</p>	<p>Laser: <i>fs pulsed laser</i> (1030 nm, 350 fs, 500kHz, até 5W)</p> <p>Estudo da ablação em microscopia ótica e interferometria ótica coerente.</p> <p>Utilização da espectrometria Raman para analisar a estrutura química do dente.</p>	<p>O limiar de ablação do esmalte é de 2,0 J/cm². O limiar de ablação da dentina é de 1,6 J/cm². A diferença de limiar é explicada pela diferença de composição entre o esmalte e a dentina.</p> <p>A análise da cavidade mostra uma ablação eficaz, com uma taxa de ablação satisfatória, sem danos colaterais nem aumento crítico da temperatura. As cavidades são bem definidas, precisas e homogêneas. Não observamos <i>smear layer</i>.</p> <p>A utilização da interferometria ótica coerente permite avaliar a rugosidade do dente preparado e observar que aumenta após o tratamento, o que será uma vantagem para a adesão do material restaurador.</p> <p>A espectrometria não apresenta variações da composição química do dente após irradiação.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
 revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Yuan et al. (2017)	China	<i>Estudo in vitro</i>	10 coroas de primeiros molares extraídos	<p>Avaliação da variação e da regulação da temperatura na polpa e nos tecidos à volta do dente durante o tratamento num espaço confinado.</p> <p>Estudo sem e com arrefecimento externo.</p>	<p>Laser: Yb:KYW (1025 nm, 400fs, 100kHz, 4,4W) controlado por um sistema robótico.</p> <p>Protótipo que simula um espaço confinado, posicionado à volta do dente.</p> <p>Coroa do dente posicionado num modelo dentário do tipo frasaco, com um termopar dentro dela. 3 outros termopares posicionados à volta do dente. Estão ligados a um termómetro.</p> <p>Sistema de arrefecimento externo com ar.</p>	<p>Sem arrefecimento, a temperatura da câmara pulpar aumenta progressivamente durante todo o tempo do tratamento.</p> <p>Com arrefecimento externo, a temperatura pulpar está estável.</p> <p>Relativamente à temperatura ambiental, está menor do que a temperatura pulpar e ainda menor em presença de arrefecimento externo com ar.</p> <p>Existe uma diferença significativa da temperatura da polpa e dos tecidos ambientais entre sem e com a utilização de arrefecimento externo.</p>

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Estudo (Autor/Ano)	País	Tipologia	Dentes envolvidos	Temas abordados	Material e Método de avaliação	Resultados/ <i>Outcome</i>
Le et al. (2016)	Portugal, França	<i>Estudo in vitro</i>	Terceiros molares recentemente extraídos, cortados em fatias de 1,5mm de espessura no sentido vestibulo-lingual	Avaliação das modificações induzidas na dentina após tratamento com o laser Estudo da taxa de ablação, da morfologia da superfície e da constituição química.	Laser: Yb:KYW (1030 nm, 560 fs, 1 kHz, 80-560mW) Avaliação da morfologia do dente com MEV. Avaliação da composição química com espectrómetro FTIR	A taxa de ablação aumenta com a fluência e está máxima com uma fluência de $17 \text{ J/cm}^2 \rightarrow 0,44 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{s}$. A eficiência máxima é de $0,015 \text{ mm}^3/\text{J}$ com uma fluência de 2 J/cm^2 . A eficiência diminui com o aumento da fluência. A fluência não modifica a qualidade do preparo, a superfície encontra-se sempre nítida, com os túbulos dentinários abertos. Não há sinais de fusão, carbonização e fissuras na superfície dentinária. O aumento da fluência provoca a deposição de detritos no fundo da cavidade que podem ser facilmente removidos com ultrassons. Após aplicação de ultrassons para remover os detritos, a espectrometria mostra que não há modificação da composição química.

Legendas: MEV - Microscópio Eletrónico de Varrimento; MO - Microscópio Ótico; FTIR - *Fourrier transform infrared spectroscopy*; EDX - *Energy dispersive X-ray*; Ca - Calcium; Po - Phosphate; fs - Femtosegundo; UV - Ultravioleta; IV - Infravermelho

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

No estudo *in vitro* realizado por Liu et al. (2014), o objetivo foi avaliar e comparar a morfologia e a rugosidade da dentina tratada com a técnica mecânica convencional, e com o laser femtosegundo. Doze coroas de pré-molares recentemente extraídas, foram seccionadas no sentido longitudinal em discos de 1,5mm de espessura. A amostra foi então dividida aleatoriamente em 8 grupos de 3 discos. 6 grupos foram tratados com o laser femtosegundo com vários parâmetros modificados; a fluência que variou entre 2, 4 e 8 J/cm², a velocidade de varrimento (v), entre 1200 e 2400 mm/s e, o espaçamento entre as linhas de varrimento (d) que foi de 12 ou 24 µm. Os dois grupos restantes foram tratados com uma turbina, com duas brocas diamantadas diferentes.

A análise de variância (ANOVA) da rugosidade com o microscópio confocal apresentou uma diferença significativa entre as fluências com uma velocidade de varrimento de 2400 mm/s e um espaçamento das linhas de varrimento de 24 µm (P<0,001).

A ANOVA, não apresentou diferença significativa da rugosidade com v=1200 mm/s e d=12 µm.

A comparação entre os dentes preparados com a turbina e os preparados com o laser, permite concluir que o laser tem a capacidade de preparar uma cavidade com uma superfície mais rugosa, o que aumenta a molhabilidade e por conseguinte, a adesão de material restaurador ao dente. Por outro lado, é possível ajustar os parâmetros do laser com o objetivo de alcançar uma superfície lisa, o que apresenta potencial utilização na área da prostodontia (Liu et al., 2014).

Luengo et al. (2013) realizaram um estudo *in vitro* a fim de avaliar as modificações micromorfológicas do esmalte após o tratamento mecânico e o tratamento com um laser femtosegundo. A amostra de 12 terceiros molares cortados em fatias de 1 mm de espessura, foi dividida em 2 grupos. O primeiro grupo, foi tratado com uma turbina com 450 000 rotações por minuto, com uma broca redonda. O segundo grupo, foi tratado com o laser e os seus parâmetros foram modificados para avaliar a suas capacidades na ablação da dentina. Os parâmetros são os seguintes: o espaçamento das linhas de varrimento (d) que variou entre 0.01 mm e 0.02 mm, a velocidade de varrimento foi de 0.05 e 0.1 mm/s, com uma energia que variou entre 0.007, 0.01, 0.03 e 0.05 mJ.

A análise da micromorfologia da superfície tratada com o laser, com microscópio eletrónico de varrimento e microscópio confocal, permitiu observar um aumento da profundidade de ablação e da taxa de ablação, com o aumento da energia óptica do laser. Também, é de salientar que aumentar a distância entre as linhas de varrimento produz uma ablação heterogénea porque o tamanho do ponto de laser encontra-se inferior ao espaçamento entre duas linhas de varrimento. Com uma duração de onda abaixo da picossegunda, obtivemos uma ablação precisa, sem danos colaterais e sinais de aquecimento dos tecidos, que não provoca dor no paciente.

A observação do esmalte tratado com a turbina, demonstrou uma superfície irregular com presença de *smear layer* e prismas de esmalte destruídos por fusão do material. A presença de fissuras no esmalte representa um grande risco de recidiva da cárie e de fracasso da restauração. O único limite foi a observação de detritos no fundo da cavidade que necessitam de ser removidos com fluídos ou ultrassons.

Este estudo permitiu então, afirmar que o tratamento da cárie dentária é mais seguro e preciso com o laser femtosegundo, sem necessitar de arrefecimento externo, nem anestesia. Além disso, em comparação com um laser convencional, este laser de femtosegundo permite retirar os materiais restauradores, e realizar a ablação sem fazer depender o coeficiente de absorção do material do comprimento de onda da radiação incidente, mas apenas da intensidade da emissão deste (Luengo et al., 2013).

Em 2018, Petrov et al. conduziram um estudo centrado na ablação do esmalte e da dentina com o laser femtosegundo, na avaliação da morfologia da superfície tratada, da alteração da temperatura e da composição química induzidas no dente durante o tratamento. Para tal, foram seccionados vários molares extraídos em fatias de 2 mm de espessura antes de serem irradiados pelo laser, fazendo variar os seguintes parâmetros: a taxa de repetição dos impulsos, a velocidade de varrimento e a energia de emissão.

A temperatura foi medida a cada 10 segundos com um termopar e a análise da sua variação mostrou que aumentou de 5°C de maneira suave. Salienta-se que a temperatura ficou abaixo do limite aceitável, permitindo evitar danos irreversíveis da polpa dentária.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

A análise microscópica apresentou uma ablação homogênea, sem fissuras, fusão, carbonização ou descoloração do material. Quanto aos túbulos dentinários, foram encontrados abertos e não se observou *smear layer* e contaminantes.

O estudo da composição química com a utilização do espectrómetro, mostrou que não houve modificações significativas da concentração e da proporção de cálcio e fosfato na dentina e no esmalte, o que certifica a ausência de aquecimento durante o tratamento.

Os autores salientaram que a cárie é um tecido desmineralizado que contém uma percentagem de água mais importante do que o dente saudável. Isto significa que será necessária menos energia para tratar os dentes cariados do que os tecidos presentes neste estudo.

Os colaboradores do presente estudo concluíram que o laser estudado, lembramos, que já se encontra disponível no mercado, é uma ferramenta de ponta altamente promissora (Petrov et al., 2018).

No estudo conduzido por Rapp et al. em 2022, foi avaliada a obtenção de um preparo cavitário de qualidade, com a utilização do laser femtosegundo sem arrefecimento externo. Vários dentes recentemente extraídos por motivo ortodôntico, foram recolhidos e utilizados inteiros ou seccionados após remoção da polpa. Estes dentes, foram esterilizados por irradiação gama (cobalto-60) e reidratados 24 horas antes do processamento a laser. Durante o teste experimental, variou-se a fluência do laser com o âmbito de analisar o seu impacto sobre o processo de ablação. O limiar de ablação, foi avaliado e as taxas ideais de ablação foram determinadas tanto para o esmalte como para a para a dentina. Respeitante às superfícies tratadas, estas foram examinadas com microscopia ótica e eletrónica de varrimento, espectroscopia Raman e profilometria ótica. A temperatura foi medida com termopares colocados nas câmaras pulpares dos dentes.

O limiar de ablação do esmalte foi de $1,1 \pm 0,1 \text{ J/cm}^2$ e o da dentina foi de $0,6 \pm 0,1 \text{ J/cm}^2$. A ablação máxima, foi obtida com uma fluência de 12 J/cm^2 , correspondente a taxas de remoção de material de $27 \text{ mm}^3/\text{min}$ para o esmalte e $39 \text{ mm}^3/\text{min}$ para a dentina. Em relação à ablação ótima, é de $0,93 \text{ mm}^3/\text{min/W}$ para o esmalte com uma fluência de $6,11 \text{ J/cm}^2$ e de $2,20 \text{ mm}^3/\text{min/W}$ para a dentina com uma fluência de

2,45 J/cm². Observaram uma diminuição da eficiência da ablação com o aumento da fluência que pode ser explicada pela energia não ser totalmente transferida à superfície tratada, mas transformada em aumento da temperatura do plasma induzido pelo laser.

A análise das superfícies tratadas em microscopia, apresentou cavidades com contornos nítidos, sem microfissuras e danos térmicos. A rugosidade da dentina ($11 \pm 2 \mu\text{m}$) foi mais importante do que a do esmalte ($7 \pm 1 \mu\text{m}$) e os sulcos realizados pelo laser, eram mais profundos na dentina como esperado da análise da eficiência de ablação.

A espectrometria não mostrou nenhuma modificação de composição química das fases minerais e orgânicas do esmalte e da dentina.

A investigação das variações de temperatura dentro da polpa dentária durante o procedimento a laser, mostrou que o aumento máximo foi de 5,5°C, ou seja, dentro do limite aceitável de aumento de temperatura durante os tratamentos dentários convencionais. Os autores destacam que é importante perceber que a medida da temperatura dos dentes num estudo *in vitro*, é sobrestimada relativamente às condições *in vivo*. Em condições clínicas, haverá dissipação da temperatura pelo fluxo sanguíneo, o ligamento e as gengivas.

Concluíram que a preparação das cavidades dentárias com laser femtosegundo, é uma técnica viável, que permite obter um preparo nítido, limpo, com uma base regular e sem danos colaterais mecânicos e térmicos, nem modificações químicas (Rapp et al., 2022).

No estudo conduzido por Chen et al. em 2016, o objetivo foi avaliar a eficiência de ablação do laser femtosegundo e dos fatores associados: a fluência, a profundidade de ablação, a velocidade de varrimento, e o espaçamento das linhas de varrimento. A amostra utilizada, foi constituída de primeiros molares extraídos cujas coroas foram cortadas em discos de 1,5 mm de espessura de maneira longitudinal. Estes discos foram irradiados com o laser cujos parâmetros foram modificados para estudar a sua influência na ablação.

Deste modo, para a avaliação do impacto da fluência na eficiência de ablação, as fluências utilizadas foram 1.56, 3.13, 4.69, 6.25 e 7.81 J/cm², com um número correspondente de camadas de ablação de 800, 800, 400, 200 e 200, para assegurar que

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

a profundidade de ablação não seja demasiada elevada. A velocidade de varrimento, foi estabelecida a 720 mm/s e o espaçamento das linhas de varrimento a 24 µm.

Para avaliar o papel do espaçamento das linhas de ablação, a fluência foi 4,69 J/cm². Os espaçamentos das linhas de ablação foram os seguintes: 6, 12, 25, 30, 40 e 50 µm, com um número de linhas de varrimento associado de 83, 42, 20, 17 e 10 para manter uma cavidade de 500 µm de largura. O correspondente número de camadas foi 100, 200, 400, 500, 600 e 800.

A avaliação da influência da profundidade de ablação na eficiência foi feita com uma velocidade de varrimento de 720mm/s, uma fluência de 4,69 J/cm² e um espaçamento das linhas de varrimento de 12 µm. O número correspondente de linhas de varrimento numa camada foi 42; e o número correspondente de camadas de varrimento foi 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300 e 400.

A observação dos preparos com microscópio confocal permitiu calcular a eficiência de

ablação com a seguinte formula: $AE = \frac{AR}{P} = \frac{V \times v}{l \times n \times N \times P}$

Em que, *AR* representa a taxa de ablação, *P* é a potência do laser, *V* o volume da cavidade, *v* a velocidade de varrimento, *l* a largura da cavidade, *n* é o número de linhas de varrimento numa camada e *N* o número de camadas de ablação. A formula pode ser simplificada do seguinte modo : $AE = V/E$ em que *E* representa a energia.

Os autores encontraram uma eficiência de ablação máxima do esmalte de 0,014 ±0,0001 mm³/J com uma fluência de 6,25 J/cm² e 200 camadas de ablação. Na dentina, a eficiência de ablação máxima foi de 0,0177 ±0,0003 mm³/J com uma fluência de 4,69 J/cm² e 400 camadas de ablação. Observaram também que o aumento da fluência favorece a eficiência de ablação até um limite, uma vez ultrapassado, a eficiência de ablação diminui.

Em relação ao espaçamento das linhas de varrimento, é importante que seja inferior ao diâmetro do ponto do laser, para obter uma boa eficiência e uma superfície nítida. Constataram que o aumento da profundidade de ablação diminui a eficiência de ablação. Chen et al. concluíram que um estudo teórico mais aprofundado da relação quantitativa entre fluência do laser e a eficiência da ablação é necessário. O limite a partir do qual a fluência reduz a eficiência pode ser explicado pelo facto que $AE = V/E$, porque quando

a fluência do laser é pequena, V aumenta mais rapidamente do que E quando o limiar de ablação (F) aumenta, pelo que a AE melhora. No entanto, quando a fluência é maior, a taxa de aumento de V é menor do que a de E , reduzindo assim a AE (Chen et al., 2016) .

Um estudo realizado em 2022 por Zong et al. avaliou a inclinação da parede axial do preparo cavitário realizados com o laser femtosegundo e o efeito dos seguintes fatores sobre esta inclinação: a fluência, o espaçamento das linhas de varrimento e o número de camadas de ablação. Utilizaram coroas de terceiros molares cortados em discos de 2 mm de espessura de maneira perpendicular ao eixo do dente, a fim de realizar 20 cavidades de 0,5 mm de largura. A fim de avaliar o papel da fluência na parede axial, prepararam 5 cavidades com uma fluência de 1,56, 3,13, 4,69, 6,25 e 7,81 J/cm² com 24 μm de espaçamento das linhas de varrimento e um número correspondente de camadas de ablação de 800, 800, 400, 200 e 200. 6 cavidades foram preparadas com um espaçamento de linhas de ablação de 6, 12, 25, 30, 40 e 50 μm com um número de camadas de ablação correspondente de 100, 200, 400, 500, 600 e 800 e uma fluência de 4,69 J/cm². Permitiu avaliar a influência do espaçamento das linhas de varrimento. Finalmente, para avaliar o efeito do número de camadas, 9 cavidades foram realizadas com um número de camadas de ablação de 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300 e 400, uma fluência de 4,69 J/cm² e 12 μm de espaçamento das linhas de varrimento.

A avaliação da inclinação da parede axial das cavidades preparadas, foi feita com um microscópio confocal, em 5 pontos para cada cavidade.

Os colaboradores deste estudo, observaram que abaixo de 1,56 J/cm² na dentina e 3,13 J/cm² no esmalte, não foi possível realizar uma cavidade completa. Com uma fluência de 6,25 J/cm², a inclinação foi de 38,71° ±0,46 no esmalte e 20,53° ±0,28 na dentina, o que permitiu afirmar que houve uma diferença significativa entre o esmalte e a dentina.

No grupo do espaçamento das linhas de varrimento, observaram que entre 6 e 25 μm, as cavidades obtidas foram completas, com 30 μm, o fundo da cavidade começou a ficar irregular e com 40 μm, foi impossível obter uma cavidade completa. O espaçamento das linhas de varrimento não teve efeito concreto na inclinação da parede axial.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Relativamente ao número de camadas, quando aumentou, a profundidade da cavidade aumentou, mas a inclinação diminuiu. A inclinação ótima foi obtida com a aplicação de 300 camadas de ablação e esta inclinação foi $(23,12 \pm 0,88)^\circ$ para a dentina e $(36,62 \pm 0,73)^\circ$ para o esmalte.

Os autores concluíram que a inclinação diminuiu com o aumento da fluência, que é importante ter um espaçamento igual ao diâmetro do ponto (*spot*) do laser e que o número de camadas não deve ser inferior a 75. A inclinação de 6° como indicada pela literatura não foi atingida com o laser femtosegundo, mas os resultados obtidos aproximaram-se dos obtidos pelos médicos dentistas os mais experimentados com uma turbina (Zong et al., 2022).

Nicolodelli et al. realizaram em 2012 um estudo sobre a influência do número de impulsos de um laser femtosegundo na estrutura morfológica dos dentes. Utilizaram 6 coroas de dentes recentemente extraídas por motivo ortodôntico e um fêmur de bovino, aqui só nos interessa a parte do estudo relativa ao dente. Ao variar o número de impulsos entre 1, 10, 100 e 1000, estudaram a morfologia das superfícies tratadas com um microscópio eletrônico de varrimento.

Observaram que um só impulso é suficiente para modificar a superfície do dente, e que ao aumentar o número de impulsos, surge uma cavidade bem definida. Após uma análise mais profunda, constataram a presença de túbulos dentinários abertos, e a evidência da ausência de danos térmicos na área tratada. A presença de túbulos abertos será uma vantagem na adesão do material restaurador. Mesmo com 1000 impulsos laser, não observaram danos térmicos nem mecânicos, com preservação das paredes internas das cavidades obtidas.

Os três colaboradores concluíram que a ablação por plasma induzido, reduziu os efeitos colaterais, utilizando uma irradiação superficial com laser femtosegundo em condições próximas ao limiar de ablação. No regime temporal do femtosegundo, as características morfológicas da cavidade foram fortemente influenciadas por uma mudança no número efetivo de pulsos. Mas mesmo para o maior número efetivo de impulsos e alta fluência, não observaram o efeito secundário de danos térmicos e mecânicos nas cavidades dos tecidos duros. Além disso, é uma ferramenta apropriada para processar tecidos de

maneira ultra-conservativa, e que permite manter a estrutura original do tecido. Este sistema de ablação a laser no regime de impulso ultracurto é eficaz e promissor para procedimentos cirúrgicos no âmbito de remover, cortar e modificar superfícies dentárias (Nicolodelli et al., 2012).

A influência do arrefecimento externo na ablação da dentina com um laser femtosegundo foi estudada por Le et al. em 2017. A amostra utilizada foi composta de discos de dentina 1,5 mm de espessuras cortados obtidos através do corte de coroas de terceiros molares recentemente extraídos. Foi dividido em três grupos: o primeiro foi tratado sem arrefecimento, o segundo com um sistema de arrefecimento projetando 5×10^{-6} L/s de ar na superfície tratada com um ângulo de 30° e o terceiro, com um sistema de arrefecimento com água e ar, com um caudal de água de 167×10^{-6} L/s a $+22^\circ\text{C}$. As experiências foram efectuadas com fluências de 2, 7 e 14 J/cm^2 , e para cada condição experimental, 3 discos de dentina foram utilizados e observados com microscopia ótica, eletrónica e espectrometria FTIR (*Fourier Transform Infrared*).

A temperatura foi medida em dois terceiros molares com um termopar diretamente colocado dentro da câmara pulpar, da parede irradiada. A primeira foi tratada sem arrefecimento com uma fluência entre 2 e 14 J/cm^2 , e a segunda com as mesmas fluências e com arrefecimento.

O estudo microscópico das superfícies tratadas e a sua composição química mostrou uma ausência de modificação em relação aos tecidos não tratados e uma ausência de efeito do arrefecimento externo na taxa de ablação e na composição química. A presença de detritos aumentou com o aumento da fluência e estes detritos foram facilmente removidos com ultrassons. A utilização de arrefecimento com água reduz a quantidade destes detritos.

Os autores observaram que, sem arrefecimento externo, a temperatura atinge $+34,5^\circ\text{C}$ após 65 segundos de tratamento com uma fluência de 7 J/cm^2 . Com uma fluência de 14 J/cm^2 , a temperatura máxima observada é de $(+39,3 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ sem arrefecimento, o que representa um aumento de $+17,5^\circ\text{C}$ relativamente à temperatura normal. Esta temperatura máxima é de $(+34,3 \pm 1,0)^\circ\text{C}$ com arrefecimento com ar e de $(+30,1 \pm 2,3)^\circ\text{C}$ com arrefecimento com ar e água.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Salientaram que, o aumento de temperatura difere consoante o laser utilizado, os seus parâmetros, a duração do tratamento, o dente tratado e o fluxo dentinário. Além disso, a ablação da dentina cariada é mais fácil, o que reduz o aumento da temperatura durante o seu tratamento. Em conclusão, a utilização de arrefecimento externo com jato de água e ar é imprescindível durante o tratamento da dentina com um laser femtosegundo, reduz de maneira eficaz o aumento da temperatura pulpar e permite também diminuir a quantidade de detritos observados na superfície tratada (Le et al., 2017).

Num estudo realizado por Rego Filho et al. em 2013, foi estudada a influência da hidratação do dente durante a sua ablação com um laser femtosegundo. Para tal, 30 pré-molares e molares foram divididos em 3 grupos de hidratação diferentes e subdivididos em grupos de esmalte e dentina. O primeiro grupo, representou o grupo de controlo, os dentes foram mantidos na água destilada até ao momento do tratamento, o segundo grupo, foi o grupo dos dentes secos, mantidos ao ar livre durante as 24 horas antes da irradiação. O último grupo, foi chamado o grupo ultraseco, os dentes foram colocados durante 4 horas num forno à +60°C.

Cada exemplar da amostra foi irradiado 15 vezes: três períodos de exposição (5, 10 e 15 segundos) e cinco potências diferentes (200, 400, 600, 800 e 1000 mW para o esmalte e 200, 400, 600, 670, 730 mW para a dentina).

A utilização do microscópio eletrónico de varrimento, permitiu medir o diâmetro das cavidades obtidas, avaliar a variação morfológica das superfícies tratadas e o limiar de ablação.

Os autores observaram que a duração da irradiação não modifica o diâmetro da cavidade obtida, ao contrário das altas potências que aumentam o diâmetro, mas causam danos térmicos à dentina. Notaram que a presença de fissuras aumenta com a desidratação, nomeadamente na dentina, e que o limiar de ablação aumentou com a desidratação para o esmalte e dentina.

Parece que o comportamento do limiar de ablação observado, pode estar relacionado com a ligação de hidrogénio, que une a água à hidroxiapatita através de sítios hidroxila. Essas fortes interações entre moléculas, são opostas às interações que formam a estrutura cristalina da hidroxiapatita (ligação covalente). Como resultado, a energia

necessária para formar a estrutura cristalina é reduzida na presença de água. Quando a água é removida, o material torna-se mais “energeticamente unido”, exigindo mais energia do plasma para quebrar as ligações cristalinas, o que aumenta o limiar de ablação. Sendo a dentina naturalmente mais hidratada do que o esmalte, torna-se então mais fácil de eliminar.

Os colaboradores observaram que a energia transferida aos detritos presentes no fundo das cavidades aumenta a temperatura e que se o dente estiver desidratado, os danos serão mais importantes porque a água não pode desempenhar o seu papel de controlo da tensão térmica e mecânica, transformando então o calor acumulado em vapor (Rego Filho et al., 2013).

Em 2023, Rapp et al. estudaram a influência do comprimento da onda do laser femtosegundo na ablação do esmalte e da dentina. Foram estudados os seguintes comprimentos de onda: 1030 nm, o que corresponde ao infravermelho próximo (IV), 515 nm, o que corresponde à luz verde e 343 nm, o que corresponde ao ultravioleta (UV).

Utilizaram dentes extraídos, com a polpa removida, para medir o limiar de ablação, a taxa de ablação e a eficiência de ablação com um microscópio ótico e um profilómetro. A espectrometria Raman, permitiu avaliar as modificações químicas da estrutura dentária durante o tratamento e, termopares foram colocados dentro da câmara pulpar dos dentes para medir a variação de temperatura.

Relativamente ao limiar de ablação, em UV foi de $0,10 \pm 0,05 \text{ J/cm}^2$ para a dentina e $0,7 \pm 0,1 \text{ J/cm}^2$ para o esmalte, em luz verde, foi de $0,20 \pm 0,05 \text{ J/cm}^2$ para a dentina e $0,85 \pm 0,05 \text{ J/cm}^2$ para o esmalte. Foi de $0,60 \pm 0,1 \text{ J/cm}^2$ para a dentina e $1,1 \pm 0,1 \text{ J/cm}^2$ para o esmalte em IV.

Em relação ao regime de eficiência ótima da ablação do esmalte, foi similar entre a luz verde e o infravermelho: foi de $0,9 \pm 0,1 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$ para o IV com uma fluência entre 4,5 e 8 J/cm^2 , e foi de $0,9 \pm 0,1 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$ para o IV com uma fluência entre 7 e 9 J/cm^2 . Na dentina, a eficiência ótima foi de $1,74 \pm 0,05 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$ para o IV com uma fluência entre 4,5 e 7 J/cm^2 para o IV e de $4,00 \pm 0,05 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$ para o IV com uma

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

fluência de $0,9 \text{ J/cm}^2$ para a luz verde. Em luz ultravioleta, os autores observaram danos causados pela acumulação de calor como carbonização.

Relativamente à sobreposição dos impulsos, os colaboradores deste estudo constataram que pode levar a uma acumulação de energia que vai causar danos térmicos. Em IV e luz verde, não observaram danos até 50% de sobreposição, a 75% de sobreposição, observaram carbonização com uma fluência de apenas $2,5 \text{ J/cm}^2$. Com uma sobreposição das ondas de 90%, obtiveram danos com qualquer fluência. Em UV, os danos sempre foram presentes.

A espectrometria não demonstrou modificação do esmalte em luz verde e IV e mostrou modificações da dentina em IV para uma sobreposição das ondas acima de 75% e em IV acima de $2,0 \text{ J/cm}^2$ de fluência. Danos terríveis foram observados com a utilização de UV, o que valida as observações anteriores.

A medida da temperatura foi feita para os três comprimentos de ondas, a uma fluência de 3 e 6 J/cm^2 , sem e com arrefecimento externo. Com uma fluência de 3 J/cm^2 , ficamos abaixo do limite aceitável de $5,5 \text{ }^\circ\text{C}$ de aumento. A 6 J/cm^2 de fluência, com o IV, ficamos abaixo do limite entre 0 e 25% de sobreposição das ondas, $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ acima do limite com uma sobreposição de 50% e $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ acima com 75% de sobreposição. Com a irradiação em luz verde, foi sempre mantido abaixo do limite aceitável de aumento da temperatura. A luz UV sempre deu resultados acima do limite aceitável.

Com a utilização de arrefecimento, sempre ficamos a $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ abaixo do limite aceitável.

Os autores deste estudo *in vitro* concluíram que a utilização de um laser femtosegundo com luz UV é vivamente desaconselhada. Para a ablação do esmalte, os comprimentos de ondas IV e verde têm uma eficiência similar, e a eficiência de ablação da dentina é duas vezes melhor em IV e mais de 4 vezes mais importante em luz verde.

Para tratar a dentina, a luz verde é muito útil, contudo, temos de controlar a fluência e a sobreposição na passagem do esmalte para a dentina. A luz IV, tem uma ablação da dentina e do esmalte similar, o que pode simplificar a estratégia de controlo durante o tratamento (Rapp et al., 2023).

No estudo conduzido por Muñoz et al. em 2012, foi avaliada a alteração morfológica da dentina após o tratamento com laser femtosegundo em comparação ao tratamento

mecânico. A amostra foi constituída de 58 discos de 1 mm de espessura cortados a partir de 6 molares extraídos, divididos aleatoriamente em dois grupos, o grupo tratado mecanicamente e o grupo tratado com o laser femtosegundo. Os parâmetros do laser foram modificados: o espaçamento das linhas de varrimento variou entre 0,01 e 0,02 mm, a energia foi de 0,007, 0,01, 0,03 e 0,05 mJ e a velocidade de varrimento variou entre 0,05 mm/s e 0,1 mm/s.

A análise microscópica, permitiu observar que o aumento da energia aumenta a profundidade da ablação e que a velocidade de varrimento não tem influência na morfologia. A redução do espaçamento entre as linhas de varrimento, permite aumentar a ablação da dentina. Isto explica o fato de, quando utilizamos um espaçamento de 0,02 mm, a dentina está irradiada mais não eliminada como observado com um espaçamento de 0,1 mm.

As cavidades realizadas com o laser foram bem definidas, sem presença de *smear layer* e com os túbulos dentinários abertos. Não apresentaram danos colaterais como fissuras, fusão e carbonização. O fundo das cavidades apresentou detritos, facilmente removidos com ultrassons.

As cavidades realizadas com tratamento mecânico, apresentaram sinais de danos térmicos e mecânicos como fissuras e carbonização, presença de *smear layer*, e oclusão dos túbulos dentinários.

Os autores concluíram que a utilização do laser na ablação da dentina em comparação com a turbina, não causa danos colaterais e preserva a dentina saudável; também, não gera vibração, o que permite diminuir o stress do paciente e a necessidade de anestesia. Com o laser, obtiveram cavidades dez vezes mais pequenas, de maior qualidade e precisão, sem necessidade de arrefecimento externo. O limite actual desta ferramenta, é o seu preço e a duração do tratamento num paciente. Salientaram que são necessários mais estudos sobre a adesão dos materiais restauradores nas superfícies tratadas com este laser (Muñoz et al., 2012).

O estudo *in vitro* realizado por Daskalova et al. em 2010, avaliou a morfologia das cavidades realizadas com um laser femtosegundo em superfície dentinária. Utilizaram discos de 1mm cortados em molares humanos recentemente extraídos, que foram

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

tratados e depois observados com um microscópio eletrônico de varrimento e um microscópio de força atômica.

Encontraram o limiar de ablação da dentina de $1,5 \text{ J/cm}^2$ e observaram que entre $1,5$ e 2 J/cm^2 e 500 impulsos, as cavidades obtidas foram nítidas e limpas. Acima de 2 J/cm^2 e 500 impulsos, apresentaram danos térmicos como fissuras, causados pelo efeito cumulativo da energia que aumenta a temperatura e inicia um processo de ablação térmica.

O microscópio de força atômica só permitiu estudar a superfície à volta da cavidade, mas não o interior desta cavidade. Permitiu observar a presença de túbulos dentinários fechados por uma fina camada de dentina resolidificada ao redor da cavidade. Isto deve-se à ionização provocada pela radiação emitida pelo laser, criando uma onda de choque que se propaga em torno da cavidade formada.

Então, em condição sub-ablativa, com uma fluência inferior a $1,5 \text{ J/cm}^2$, o laser femtosegundo é uma ferramenta eficaz para selar os túbulos dentinários de modo a reduzir a hipersensibilidade dentária e prevenir as cáries. Em condição ablativa, cria cavidades de excelente qualidade, sem danos colaterais (Daskalova et al., 2010).

Hikov et al. em 2017, procuraram, os parâmetros adequados de um laser femtosegundo durante a preparação cavitária de um dente em dentística minimamente invasiva. Vários molares extraídos foram cortados em fatias de 2 mm de espessura e irradiados com o laser femtosegundo antes de serem observados em microscopia ótica e interferometria ótica coerente (também conhecida pelo acrónimo inglês: OCT). Uma avaliação da modificação da estrutura química foi feita com espectrometria Raman.

Os autores consideraram uma ablação eficaz como sendo uma ablação com uma taxa de ablação satisfatória, com aumento mínimo da temperatura dos tecidos e ausência de danos colaterais. Modificando os parâmetros do laser, encontraram os parâmetros ótimos que conduzem a esta ablação eficaz e controlada. Estes parâmetros foram 100% de energia pulsada, velocidade de varrimento de 500 mm/s e taxa de repetição de 100 kHz. Desta forma, as cavidades foram bem definidas, precisas e homogéneas, sem danos colaterais nem fissuras.

O limiar de ablação do esmalte foi de 2,0 J/cm² e de 1,6 J/cm² para a dentina. Esta diferença pode ser explicada pela diferença de composição dos dois tecidos, o esmalte é constituído por 85% de cristais de hidroxiapatita, 12% de água e 3% de materiais orgânicos enquanto a dentina é constituída por 47% de cristais, 20% de água e 33% de materiais orgânicos, o que a torna mais fácil de eliminar.

A superfície analisada com OCT, permitiu avaliar a sua rugosidade, e observaram que após o tratamento, houve um aumento de 0,164 µm para 2,31 µm, o que constitui uma vantagem na adesão do material restaurador ao preparo cavitário. Não foram observados contaminantes e *smear layer* na superfície irradiada. A espectrometria não mostrou nenhum sinal de modificação química dos dentes tratados.

Os autores concluíram que o laser femtosegundo é uma ferramenta promissora no tratamento das cáries, mas que estudos suplementares são necessários para melhorar a velocidade do tratamento de modo a ultrapassar a da turbina (Hikov et al., 2017).

Yuan et al. em 2017, realizaram uma medida e uma regulação do calor, produzido durante o tratamento de um dente com um laser femtosegundo num espaço confinado. Para tal, foram utilizados 10 primeiros molares recentemente extraídos, onde foram colocados termopares dentro das câmaras pulpares. Uma vez preparada, as coroas foram colocadas num modelo dentário de tipo Frasaco. Foi criado um protótipo simulando um espaço confinado, que foi colocado ao redor da coroa tratada. Três outros termopares foram colocados à volta da coroa, dentro do espaço confinado, para medir as temperaturas ambientais durante o tratamento com o laser. Todos os termopares registaram uma medida da temperatura a cada dez segundos. O estudo foi inicialmente feito sem arrefecimento, e depois com arrefecimento por fluxo de ar.

Os colaboradores do estudo obteram os seguintes resultados: não foi observada uma diferença significativa da temperatura para os dez molares tratados. Na polpa dentária, a temperatura aumentou gradualmente sem arrefecimento e estabilizou-se com arrefecimento. Observaram uma diferença significativa entre a temperatura sem e com arrefecimento, tanto na polpa, como na temperatura do ambiente.

Concluíram que a automatização da preparação de cavidades com o laser femtosegundo pode ser apropriado, mas estudos suplementares são necessários sobre a segurança e

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

precisão do tratamento. As limitações deste tipo de laser, são o seu custo elevado, a sua complexidade de operação e a duração do tratamento. Os parâmetros precisam de ser modificados em função do dente a tratar, e o braço articulado do laser causa uma perda de energia (Yuan et al., 2017).

Uma avaliação das modificações estruturais induzidas na dentina durante o seu tratamento com um laser femtosegundo foi feita por Le et al. em 2016. A amostra foi constituída de 19 discos de dentina de 1,5 mm de espessura, cortados em coroas de terceiros molares extraídos, de maneira paralela ao plano oclusal. A fluência do laser variou entre 2, 7 e 14 J/cm² e para cada fluência, 6 discos foram tratados, dos quais 2 foram aleatoriamente selecionados para a avaliação da superfície com microscopia eletrónica. As restantes amostras foram analisadas com espectroscopia FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*).

Os autores observaram um aumento da taxa de ablação, bem com o aumento da fluência que atingiu 0,44x10⁻² mm³/s com 14 J/cm². A eficiência máxima de ablação foi de 0,015 mm³/J, com uma fluência de 2 J/cm² e diminuiu com o aumento da fluência.

A análise da superfície tratada com uma fluência de 2 J/cm² mostrou uma dentina irregular, com os túbulos dentinários abertos e com poucos detritos no fundo da cavidade. O aumento da fluência provocou um aumento do depósito de detritos, que foram facilmente removidos com ultrassons. Isso, deixou a superfície dentinária limpa, sem danos colaterais e com os túbulos abertos, mesmo para uma fluência de 14 J/cm².

Através da utilização da espectroscopia observaram que as amostras tratadas com uma fluência de 2 J/cm² não apresentaram modificação significativa relativamente à dentina não irradiada. Os discos tratados com 7 e 14 J/cm² apresentaram um espectro similar ao do fosfato de cálcio amorfo, mas após remoção dos detritos com ultrassons, o espectro tornou-se similar à da dentina não irradiada.

Os colaboradores deste estudo concluíram que os detritos observados são constituídos de fosfato de cálcio amorfo resultante da decomposição da dentina, e que o laser não degrada nem altera a superfície dentinária. A taxa máxima de ablação do laser de 0,44x10⁻² mm³/s, encontra-se muito inferior à do tratamento com turbina, o que salienta

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

a necessidade de estudos mais aprofundados para aumentar e reduzir a duração do tratamento (Le et al., 2016).

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

4. DISCUSSÃO

Mediante a literatura científica consultada e analisada para a execução do presente trabalho de revisão sistemática, e tendo como suporte a análise dos quinze artigos científicos que cumpriram os critérios de elegibilidade, consideramos que a utilização do laser femtosegundo na preparação de cavidades no esmalte e na dentina de dentes humanos apresenta resultados clínicos muito satisfatórios. Os autores dos estudos analisados afirmaram que este tipo de laser representa um avanço significativo no tratamento das cáries dentárias em clínica, e que poderá, sem dúvida, substituir o tratamento mecânico convencional atual nas próximas décadas. No entanto, é importante ter em conta que todos os estudos analisados neste trabalho são estudos *in vitro*. Por conseguinte, é importante não tirar conclusões precipitadas, uma vez que os resultados do laser de femtosegundo em condições *in vivo* podem ser diferentes.

Nos estudos selecionados para a comparação entre a utilização do laser femtosegundo e a turbina+broca, a observação das superfícies tratadas com o laser mostrou uma homogeneidade e uma nitidez claramente superior. As cavidades realizadas sempre foram limpas, bem definidas e mais precisas do que as efetuadas com uma turbina. Os autores dos artigos científicos em análise, observaram sempre cavidades sem presença de danos colaterais térmicos e ou mecânicos, como fissuras, fusão e carbonização. Nos estudos analisados, a avaliação da composição química dos dentes tratados com o laser femtosegundo não mostrou nenhuma alteração em comparação com os dentes antes do tratamento (Hikov et al., 2017; Le et al., 2016; Le et al., 2017; Petrov et al., 2018; Rapp et al., 2022; Rapp et al., 2023).

O laser femtosegundo pode ser útil no domínio da dentística minimamente invasiva (Nicolodelli et al., 2012), visto que de facto esta ferramenta elimina apenas o tecido cariado preservando o tecido saudável. Além disto, permite realizar cavidades dez vezes mais pequenas do que a turbina o permitiria, o que prova a sua excelente precisão (Luengo et al., 2013; Muñoz et al., 2012).

Os diferentes estudos da rugosidade das cavidades realizadas conduziram ao consenso de que a rugosidade aumenta significativamente em relação aos dentes não tratados ou tratados com uma turbina (Hikov et al., 2017; Liu et al., 2014; Petrov et al., 2018). Isto apresenta uma grande vantagem tecnológica porque permite aumentar a molhabilidade e, por conseguinte, a adesão do material restaurador com o dente preparado com o laser femtosegundo, sem necessidade de ataque químico por ácido (Liu et al., 2014).

No estudo da inclinação da parede axial obtida durante o tratamento de dentes com o laser femtosegundo observou-se que a inclinação ótima é de $(38,71 \pm 0,46)^\circ$ para o esmalte e $(20,53 \pm 0,28)^\circ$ para a dentina (Zong et al., 2022). O resultado encontra-se bem dentro do limite inferior aos 6° recomendados pela literatura, mas é semelhante ao obtido pelos dentistas mais experimentados na utilização da turbina.

Dos resultados da avaliação da temperatura e da necessidade da utilização do arrefecimento externo durante o tratamento foram mais divergentes. De acordo com Luengo et al. (2013) e Petrov et al. (2018), a variação da temperatura pulpar durante o tratamento encontra-se dentro do limite aceitável de aumento da temperatura e a utilização de um sistema de arrefecimento externo não é necessário. Rapp et al. (2022) observaram um aumento da temperatura de $5,5^\circ\text{C}$, que se encontra sobrestimado em comparação com as condições *in vivo*. Mas, ao contrário dos autores precedentes, sublinharam que a variação da temperatura pode ser diminuída com a utilização de arrefecimento externo por jato de ar comprimido. Da mesma maneira, Yuan et al. (2017) constatou a necessidade da aplicação de ar comprimido na superfície tratada durante a automatização da preparação de cavidades dentárias com um laser femtosegundo. Contudo, segundo Le et al. (2017) que apresentam uma perspetiva mais conservadora, a irrigação com água e ar durante o processo de tratamento dos dentes com laser é imprescindível para evitar qualquer risco de danos colaterais, de forma a dissipar o calor produzido durante o tratamento e impedir a desidratação da dentina. Portanto, somos inclinados a concluir, que apesar de a variação de temperatura estar dentro do limite

aceitável, será mais prudente do ponto de vista clínico, utilizar arrefecimento externo por jato de ar comprimido.

Este pequeno aumento da temperatura e a total ausência de vibração mecânica induzida pelo laser sugerem que o stress e o desconforto do paciente serão muito menores no consultório, em comparação com o tratamento convencional mecânico. Assim, a anestesia nem sequer será necessária durante o tratamento da cárie (Luengo et al., 2013; Muñoz et al., 2012).

A diminuição da água estrutural no tecido a tratar diminui o limiar de ablação, e a presença desta água estrutural no tecido dentário duro atua como um controlador da tensão mecânica induzido durante o tratamento (Rego Filho et al., 2013). Além disso, foi observado localmente um aumento no nível de danos térmicos para a desidratação crescente, e este fenómeno pode ocorrer devido à presença da água estrutural que permite suprimir localmente a absorção de calor por outros componentes do tecido e transformar esta em estado de vapor.

Toma-se necessário estudar meticolosamente os parâmetros de funcionamento do laser femtosegundo por forma a garantir uma ablação precisa criando assim uma cavidade nítida e de qualidade. Esta análise à optimização de funcionamento do laser é um passo crucial para melhorar a eficiência do processo de tratamento dos dentes, permitindo que a interação entre a radiação laser e o tecido dentário seja controlada com precisão, e assim, garantir bons resultados clínicos.

Relativamente ao comprimento de ondas de emissão do laser femtosegundo a utilizar na preparação de cavidades dentárias, do estudo realizado por Rapp et al. em (2023) com três tipos de radiação (1030 nm, 515 nm e 343 nm), chegou-se à conclusão que a radiação a 343 nm (portanto, ultravioleta) deve ser evitada por originar muitos danos ao dente. É possível efetuar uma ablação precisa, eficiente e segura, com um aumento mínimo de temperatura, tanto em dentina como em esmalte, utilizando um laser femtosegundo de comprimento de onda de emissão centrado nos 1030 nm, ou em

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

alternativa, nos 515 nm (sendo que esta corresponde à frequência dupla de emissão nos 1030 nm).

No que respeita ao efeito do número de impulsos laser na ablação do tecido dentário, conclui-se que este número de impulsos não tem nenhum efeito sobre a qualidade das cavidades preparadas e não pode aumentar o risco de danificar os tecidos (Nicolodelli et al., 2012).

Relativamente à fluência, vários estudos afirmaram que a ablação da dentina é mais fácil do que a ablação de esmalte, que necessita uma fluência maior para conseguir obter um tratamento de qualidade. Isto explica-se pela diferença de composição entre o esmalte e a dentina, nomeadamente, o nível de água em ambos os tecidos. Os estudos de Chen et al. (2016), Le et al. (2016) e Rapp et al. (2022) concluíram que o aumento da fluência reduz a eficiência da ablação dos tecidos duros dentários. Portanto, existe um limiar de fluência para além do qual a eficiência diminui (Chen et al., 2016). Dos estudos analisados podemos extrair as fluências ótimas de ablação em cerca de 6 J/cm² para o esmalte e 2 J/cm² para a dentina (Le et al. 2016; Rapp et al., 2022; Zong et al., 2022), apesar da fluência ótima da ablação da dentina observada por Chen et al. (2016) ser superior (4,69 J/cm²), consideramos mais prudente começar por valores inferiores.

O espaçamento das linhas de varrimento é um fator importante da qualidade da ablação, e deve ser inferior ou igual ao diâmetro do ponto (*spot*) do laser para permitir uma sobreposição das linhas de varrimento e uma ablação eficaz e homogênea (Chen et al., 2016; Luengo et al., 2013; Muñoz et al., 2012; Zong et al., 2022). Por último a velocidade de varrimento na ablação não tem efeito no aspeto morfológico da superfície tratada (Luengo et al., 2013) e uma baixa velocidade de varrimento aumenta a taxa de ablação (Muñoz et al., 2012).

No que respeita às limitações da literatura científica consultada e por parte dos investigadores que realizaram as experiências *in vitro*, é consensual que serão necessários mais estudos *in vivo*, em dentes num ambiente clínico. Dado que existe uma

variabilidade entre os pacientes e até num mesmo paciente, será importante estudar o efeito da variação dos diferentes parâmetros físicos do laser femtosegundo na boca a fim de compreender em que medida será necessário alterar a abordagem do tratamento em função do caso clínico em consultório. Como os estudos analisados se basearam em dentes saudáveis, sem presença de lesões, serão necessários mais estudos em dentes que apresentam cáries por forma a estudar o real efeito do laser femtosegundo no tecido cariado. Além disso, dos estudos selecionados, apenas três tinham como objetivo comparar o tratamento de cavidades dentárias com o laser de femtosegundo e com o tratamento com turbina dentária (Liu et al., 2014; Luengo et al., 2013; Muñoz et al., 2012). Esta limitação em termos de número de estudos comparativos evidencia a necessidade de mais estudos, para se poder definir com exatidão e rigor científico qual a técnica que oferece vantagens mais significativas. É indispensável uma análise mais exaustiva e aprofundada para se poderem tirar conclusões definitivas sobre o valor relativo de cada método na prática clínica.

Com base os resultados analisados neste trabalho de revisão sistemática, podemos construir a seguinte tabela que resume os principais parâmetros aconselhados na utilização do laser femtosegundo para fins ablativos do esmalte e da dentina.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

Tabela 4 – *parâmetros aconselhados na utilização do laser femtosegundo*

Parâmetros do laser femtosegundo	Recomendações
Comprimento de onda de emissão [nm]	1030 (preferencial) ~ 515 (como segunda opção)
Fluência [J/cm ²]	6 (para o esmalte) 2 (para a dentina)
Largura do impulso laser [fs]	275 a 400
Taxa de repetição [kHz]	50 a 500
Espaçamento das linhas de varrimento	Igual ou inferior ao diâmetro (spot : 25µm) do laser
Número de impulsos	Não apresentou ter efeito na ablação
Arrefecimento da superfície dentária	Preferencialmente com jato de ar+água para se obter uma ablação mais segura

5. CONCLUSÃO

Todos os artigos científicos consultados e analisados no presente trabalho de revisão sistemática demonstraram que o laser femtosegundo pode realizar uma ablação de qualidade e uma preparação de cavidades nítidas e precisas no esmalte e na dentina de dentes permanentes humanos sãos, sem que ocorram alterações significativas em termos de variação de temperatura pulpar ou em termos da composição química das superfícies tratadas.

No futuro, podemos esperar que esta ferramenta tecnológica surja como uma alternativa viável às brocas mecânicas de turbina, de modo a diminuir os danos colaterais que esta provoca durante a ablação dos tecidos dentários duros e, sobretudo, no tratamento da cárie dentária.

Devido à precisão e à capacidade de ablação do laser, julgamos que este poderá abrir novas perspectivas para um tratamento dentário preciso, mais conservador, sem dor, e que será cada vez mais solicitado nos tratamentos dentários, não só pelos médicos dentistas, mas também pelos pacientes. Esta abordagem conservadora do tratamento dentário, estará, por conseguinte, em plena sintonia com a filosofia da dentística minimamente invasiva. Contudo, o custo da tecnologia é actualmente um impedimento a ter em conta.

Prevemos que a sinergia do laser de femtosegundo e dos recentes avanços na robótica permitirá desenvolver, num futuro próximo, um dispositivo robótico intraoral, que se fixará aos dentes e será controlado para tratar os dentes de maneira eficaz, rápida e precisa. Isto permitirá oferecer aos pacientes tratamentos de qualidade, de alta precisão e indolores, sem recurso à anestesia, e constituirá uma verdadeira solução ao problema de saúde pública que representa a cárie dentária. Facilitará também o trabalho do médico dentista e reduzirá o risco de infeções cruzadas.

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

No entanto, antes de o laser femtosegundo poder vir a substituir os tratamentos convencionais da cárie, serão necessários mais estudos, nomeadamente *in vivo*, em pacientes com dentes cariados. Vários estudos na adesão dos materiais restauradores à superfície tratada, na temperatura dentro da boca e nos tecidos periodontais serão também precisos. Torna-se imperativo diminuir o custo desta tecnologia e reduzir o tempo de tratamento, de maneira a que possa ser amplamente adoptado pela classe médica como instrumento imprescindível no tratamento dentário dos pacientes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chen, H., Li, H., Sun, Y. C., Wang, Y., & Lü, P. J. (2016). Femtosecond laser for cavity preparation in enamel and dentin: ablation efficiency related factors. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep20950>
- Daskalova, A., Bashir, S., & Husinsky, W. (2010). Morphology of ablation craters generated by ultra-short laser pulses in dentin surfaces: AFM and ESEM evaluation. *Applied Surface Science*, 257(3), 1119-1124. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.08.037>
- Hikov, T., Pecheva, E., Montgomery, P., Antoni, F., Leong-Hoi, A., & Petrov, T. (2017). Precise femtosecond laser ablation of dental hard tissue: preliminary investigation on adequate laser parameters. *Journal of Physics : Conference Series*, 794. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/794/1/012036>
- Le, Q. T., Bertrand, C. & Vilar, R. (2016). Structural modifications induced in dentin by femtosecond laser. *Journal of Biomedical Optics*, 21(12). <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.12.125007>
- Le, Q. T., Vilar, R., & Bertrand, C. (2017). Influence of external cooling on the femtosecond laser ablation of dentin. *Lasers in Medical Science*, 32(9), 1943-1951. <https://doi.org/10.1007/s10103-017-2277-8>
- Liu, J., Chen, H., Ge, W., Wang, Y., Sun, Y., Wang, Y., & Lü, P. J. (2014). A Roughness Study of Ytterbium-Doped Potassium Yttrium Tungstate (YB: KYW) Thin-Disk Femtosecond Ablated Dentin. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 5(1), 32-38.
- Luengo, M., Portillo, M., Sánchez, J. M., Peix, M., Moreno, P., García, A., Montero, J., & Albaladejo, A. (2012). Evaluation of micromorphological changes in tooth enamel after mechanical and ultrafast laser preparation of surface cavities. *Lasers in Medical Science*, 28, 267-273. <https://doi.org/10.1007/s10103-012-1144-x>
- Muñoz, M., Luengo, M., Llorente, J., Sánchez, M., Albaladejo, A., García, A., & Pedraz, P. (2012). Morphological alterations in dentine after mechanical treatment and ultrashort pulse laser. *Lasers in Medical Science*, 27(1), 53-58. <https://doi.org/10.1007/s10103-010-0845-2>
- Nibolodelli, G., de Fátima Zanirato Lizarelli, R., & Salvador Bagnato, V. (2012). Influence of effective number of pulses on the morphological structure of teeth and bovine femur after femtosecond laser ablation. *Journal of Biomedical Optics*, 14(4). <https://doi.org/10.1117/1.JBO.17.4.048001>
- Petrov, T., Pecheva, E., Walmsley, A., & Dimov, S. (2018). Femtosecond laser ablation of dentin and enamel for fast and more precise dental cavity preparation. *Materials Science & Engineering C*, 90, 433-438. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.070>
- Rapp, L., Madden, S., Brand, J., Walsh, L., Spallek, H., Zuaite, O., Habeb, A., Hirst, T., & Rode, A. (2022). Femtosecond laser dentistry for precise and efficient cavity preparation in teeth. *Biomedical Optics Express*, 13(9). <https://doi.org/10.1364/BOE.463756>
- Rapp, L., Madden, S., Brand, J., Maximova, K., Walsh, L., Spallek, H., Zuaite, O., Habeb, A., Hirst, T., & Rode, A. (2023). Investigation of laser wavelength effect on the ablation of enamel and

O tratamento da cárie dentária com laser femtosegundo : o futuro da dentística minimamente invasiva ?
revisão sistemática

dentin using femtosecond laser pulses. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47551-5>

Rego Filho, F., Dutra-Corrêa, M., Nicolodelli, G. Bagnato, V., & De Araujo, M. (2013). Influence of hydration state on the ultrashort laser ablation of dental hard tissues. *Lasers in Medical Science*, 28(1), 215-222. <https://doi.org/10.1007/s10103-012-1118-z>

Sheth, V., Shah, P., Jain, R., Bhanushali, N., & Bhatnagar, V. (2022). Development and validation of a risk-of-bias tool for assessing in vitro studies conducted in dentistry: The QUIN. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.05.019>

Yuan, F., Zheng, J., Sun, Y., Wang, Y., & Lyu, P. (2017). Regulation and measurement of the heat generated by automatic tooth preparation in a confined space. *Photomedicine and Laser Surgery*, 35(6), 332-337. <http://doi.org/10.1089/pho.2016.4242>

Zong, X., Wang, Y., Sun, Y., & Chen, H. (2022). Femtosecond laser for cavity preparation in enamel and dentin : axial wall tape related factors. *Photobiomodulation, Photomedicine, and Laser Surgery*, 40(6), 417-423. <https://doi.org/10.1089/photob.2021.0126>