

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

DESMINERALIZAÇÃO E REMINERALIZAÇÃO DO ESMALTE DENTÁRIO: COMPREENSÃO DOS MECANISMOS BIOQUÍMICOS E OTIMIZAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS PREVENTIVAS ATRAVÉS DA COMUNICAÇÃO

Trabalho submetido por
Lilou Vanpeperstraete
para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

julho de 2026

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

DESMINERALIZAÇÃO E REMINERALIZAÇÃO DO ESMALTE DENTÁRIO: COMPREENSÃO DOS MECANISMOS BIOQUÍMICOS E OTIMIZAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS PREVENTIVAS ATRAVÉS DA COMUNICAÇÃO

Trabalho submetido por
Lilou Vanpeperstraete
para a obtenção do grau de **Mestre** em Medicina Dentária

Trabalho orientado por
Doutor Carlos Monteiro

e coorientado por
Doutora Júlia Antunes

julho de 2026

DEDICATÓRIA

Merci à mes meilleures amies, Aline, Agathe et Léonore, pour votre soutien quotidien et pour être les futures patientes de votre dentiste personnelle. Léonore, merci d'être ma meilleure amie, de m'écouter, de me conseiller sur la façon d'écrire une thèse en faisant des pauses toutes les 30 minutes et d'être toujours à mes côtés, quoi qu'il arrive. Merci d'avoir rendu ces cinq années loin de vous plus faciles, d'être venue me rendre visite si souvent à Lisbonne, d'avoir rencontré mes nouveaux amis et d'avoir partagé mon quotidien. Merci d'être un pilier dans ma vie, d'avoir l'impression que nous partageons le même cerveau, de grandir ensemble depuis maintenant onze ans, de voyager avec moi et, surtout, merci d'être exactement la personne que tu es et d'être ma meilleure amie.

À ma famille, qui compte sur moi depuis la première année pour être la dentiste de la famille, merci pour tout votre soutien. Je me sens honorée et heureuse d'avoir une famille aussi présente dans ma vie. À mes parents, qui sont mes meilleurs amis, merci pour tous les sacrifices que vous avez faits pour moi afin de me permettre d'étudier à plus de 2000 km de chez vous et de vivre cette expérience unique que furent ces cinq années d'études à l'étranger. Merci pour votre présence tout au long de mon parcours académique, mais aussi à chaque étape de ma vie. Je suis très fière de devenir la première dentiste de la famille et de pouvoir vous rendre si fiers de moi.

Merci à mon groupe de besties à Lisbonne. Merci à Yassine et Omar, les personnes les plus drôles que j'ai jamais rencontrées. Merci pour tous les services que vous m'avez rendus, y compris répondre au téléphone à n'importe quelle heure, même si je sais parfaitement que ta première réaction Yassine sera toujours de demander : « Mais pourquoi est-ce que tu me déranges très concrètement ? ». Merci pour nos deux années de colocation, qui n'ont pas toujours été faciles à supporter, surtout lorsque vous frappiez les cartons en jouant à FIFA, et que votre activité préférée fut de critiquer ma cuisine. Merci à Omar d'être la personne qui répond le moins souvent au téléphone mais d'avoir cette place si particulière, merci de tes nombreux conseils et de nos longues conversations. Merci à Reyhan d'être drôle malgré toi, de porter tes clés autour du cou tous les matins. Merci de m'avoir traumatisée avec ta For You Page et de faire des débats complètement inutiles qui durent des heures. Merci d'avoir partagé ces 5 ans avec toi et de m'avoir autant fait rire, de nous avoir vu grandir ensemble, d'avoir été mon soutien pendant mon premier semi-marathon. Merci à Younes de me rappeler chaque matin de détendre la ride de mon front lorsque je fixe l'ordinateur, de toujours me regarder de travers quand j'arrive le matin en disant « Wshhhh Younes », d'enregistrer des messages vocaux pendant des heures dans les couloirs de la clinique et de nous avoir allumé tous les barbecues. Merci à tous d'avoir partagés et rendus ces 5 années de nos vies si agréables et si drôles.

AGRADECIMENTOS

Quero começar por expressar a minha profunda gratidão ao meu orientador de tese, Carlos Monteiro, pela sua orientação, disponibilidade e pelos seus valiosos conselhos ao longo deste trabalho. O seu rigor científico e o seu apoio constante foram essenciais para a concretização desta tese.

Gostaria também de agradecer à minha coorientadora de tese Júlia Antunes pelo seu acompanhamento, disponibilidade e contributo para a realização deste trabalho.

À Egas Moniz School of Health and Science, pelos cinco anos de formação de excelência, que moldaram não só a minha vida académica, mas também a minha vida pessoal. Levo comigo aprendizagens, experiências e pessoas que me marcaram profundamente.

Agradeço igualmente a todos os professores da faculdade pelos conhecimentos transmitidos ao longo destes cinco anos e ao pessoal da clínica universitária pela sua ajuda, profissionalismo e apoio diário durante a minha formação clínica.

Merci à ma partenaire, ma partenaire, ma Noelyse. Merci d'avoir toujours été présente, de m'avoir écoutée pendant des heures raconter mes histoires, de râler avec moi dès 7 h 50 du matin parce que les Portugais ne savent pas conduire. Merci d'être devenue une présence si importante dans ma vie, d'avoir partagé tous ces moments ensemble, d'avoir rendu Lisbonne plus léger, de m'avoir soutenue tout au long de ces années de clinique avec nos patients les plus fous les uns que les autres, de m'avoir aidée et guidée. À notre nouvelle vie de dentistes, qui commence maintenant ensemble un peu plus loin que 30 secondes de marche l'une de l'autre mais à toutes nos futures vacances et nos weekends.

Merci à Charlotte, à qui je dois le début de cette thèse. Nous avons eu la vision lors de nos petits-déjeuners consacrés à la thèse. Tu as été ma plus belle découverte de cette cinquième année. Merci pour cette amitié construite autour de verres de vin rouge, de restaurants dans Lisbonne et de nos petites courses pour raconter les potins. Merci d'être aussi passionnée par les potins, d'aimer écouter des histoires pleines de détails et de réussir à raconter la même histoire 107 fois en y ajoutant toujours quelque chose de nouveau. Merci pour tous ces moments à Lisbonne, loin de nos parents, accompagnées de nos « fils ».

Declaração de Honra

Código | IMP-EM-EI-111_01

Declaro, por minha honra, que o presente trabalho académico é original e foi elaborado por mim próprio (a), não se tendo recorrido a quaisquer outras fontes, para além das indicadas, usadas, adotadas literalmente ou adaptados a partir dos seus originais (em fontes impressas, não impressas ou na internet) e encontram-se adequados, identificados e citados, com observância das convenções do trabalho académico em vigor.

Mais declaro que esta Trabalho de Projeto final Desmineralização e remineralização do esmalte dentário: compreensão dos mecanismos bioquímicos e otimização das estratégias preventivas através da comunicação não foi apresentada, para efeitos de avaliação, a qualquer outra entidade ou instituição, para além da(s) diretamente envolvida(s) na sua elaboração, e que os conteúdos das versões impressa e eletrónica são inteiramente coincidentes.

Declaro, igualmente, encontrar-me ciente de que a inclusão, neste texto, de qualquer falsa declaração terá consequências legais.

Data: 11/06/2026

Declaração Conflito de Interesses (DCI)

Código | IMP-EM-EI-110_01

Eu Lilou Vanpeperstraete referente a Trabalho de Projeto final Desmineralização e remineralização do esmalte dentário: compreensão dos mecanismos bioquímicos e otimização das estratégias preventivas através da comunicação declaro que não possuo conflitos de interesse de ordem pessoal, comercial, académica, político ou financeiro.

Data: 11/06/2026

Declaração de Financiamento

Código | IMP-EM-EI-113_01

Eu Lilou Vanpeperstraete referente a Trabalho de Projeto final Desmineralização e remineralização do esmalte dentário: compreensão dos mecanismos bioquímicos e otimização das estratégias preventivas através da comunicação. Declaro que o meu trabalho não se encontra financiado.

Declaração de Ética e Registo

Código | IMP-EM-EI-112_01

Eu Lilou Vanpeperstraete referente a Trabalho de Projeto final Desmineralização e remineralização do esmalte dentário: compreensão dos mecanismos bioquímicos e otimização das estratégias preventivas através da comunicação

declaro que o meu trabalho não requer aprovação por Comissão de Ética, uma vez que se trata de uma revisão bibliográfica baseada exclusivamente em literatura já publicada, não envolvendo a recolha de dados.

Data: 11/06/2026

Declaração de Disponibilidade de Dados

Código | IMP-EM-EI-150

A presente Declaração de Disponibilidade de Dados reflete o compromisso do Instituto Universitário Egas Moniz em promover a transparência, a reprodutibilidade científica e o acesso aberto aos dados gerados no âmbito dos projetos a decorrer nesta IES, em conformidade com os princípios éticos e legais aplicáveis e com os princípios FAIR. Esta declaração estabelece as condições e as diretrizes para o acesso, o compartilhamento e a reutilização dos dados, garantindo que sejam utilizados de forma responsável e em benefício da comunidade científica e da sociedade.

A seguinte tabela apresenta diferentes opções de partilha de dados, incluindo exemplos de formatos e níveis de acessibilidade. Deverá selecionar a(s) opção(ões) que melhor se adequa(m) ao seu projeto, assegurando o cumprimento das diretrizes éticas e científicas aplicáveis.

Tabela 1: Exemplos de declarações de disponibilidade de dados. Onde aparece [nome do repositório, por exemplo, "pure"] deve ser preenchido

Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com "x"
Dados disponíveis num repositório público que emite conjuntos de dados com DOIs	Os dados que apoiam as conclusões deste estudo estão disponíveis em [nome do repositório, por exemplo, "pure"] em http://doi.org/[doi] , número de referência [número de referência].	Partilha geral sem pedido	
Dados abertamente disponíveis num repositório público que não emite DOIs	Os dados que apoiam as conclusões deste estudo estão disponíveis em [nome do repositório] em [URL], número de referência [número de referência].	Partilha geral sem pedido	
Dados derivados de recursos do domínio público	Os dados que apoiam as conclusões deste estudo estão disponíveis em [nome do repositório] em [URL/DOI], número de referência [número de referência]. Estes dados foram obtidos a partir dos seguintes recursos disponíveis no domínio público: [listar recursos e URLs]	Partilha geral sem pedido	

Declaração de Disponibilidade de Dados

Código | IMP-EM-EI-150

Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com "x"
Dados disponíveis no artigo ou nos seus materiais suplementares	Os autores confirmam que os dados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis no artigo [e/ou] nos seus materiais suplementares.	Básico, partilhar a pedido	
Dados gerados numa instalação central de grande escala, disponíveis mediante pedido	Os dados em bruto foram gerados em [nome da instalação]. Os dados derivados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto do autor correspondente [iniciais], mediante pedido.	Básico, partilhar a pedido	
Embargo dos dados devido a restrições comerciais	Os dados que suportam os resultados estarão disponíveis em [nome do repositório] em [URL / ligação DOI] após um embargo de [6 meses] a partir da data de publicação para permitir a comercialização dos resultados da investigação.	Básico, Partilhar a pedido	
Dados disponíveis a pedido devido a restrições de privacidade/éticas	Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis mediante pedido ao autor correspondente, [iniciais]. Os dados não estão disponíveis ao público devido a [restrições, por exemplo, o facto de conterem informações que podem comprometer a privacidade dos participantes na investigação].	Básico, Partilhar a pedido	
Dados sujeitos a restrições de terceiros	Os dados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis [junto de] [terceiros]. Aplicam-se restrições à disponibilidade destes dados, que foram utilizados sob licença para este estudo. Os dados estão disponíveis [através dos autores / no URL] com a permissão de [terceiros].	Básico, Partilhar a pedido	

Declaração de Disponibilidade de Dados

Código | IMP-EM-EI-150

Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com "x"
Dados disponíveis a pedido dos autores	Os dados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto do autor correspondente, [iniciais do autor], mediante pedido razoável.	Básico, Partilhar a pedido	
Partilha de dados não aplicável - não foram gerados novos dados	A partilha de dados não é aplicável a este artigo, uma vez que não foram criados ou analisados novos dados neste estudo.	-	x
Dados não digitais disponíveis	Os dados não digitais que suportam este estudo são conservados em [adicionar local].	Básicos	
Dados não disponíveis devido a restrições [éticas/legais/comerciais]	Devido à natureza da investigação, os dados de apoio [éticos/legais/comerciais] não estão disponíveis.	-	
Dados não disponíveis - consentimento do participante	Os participantes neste estudo não deram consentimento escrito para que os seus dados fossem partilhados publicamente, pelo que, devido à natureza sensível da investigação, os dados de apoio não estão disponíveis.	-	

O Orientando: Lilou Vanpeperstraete



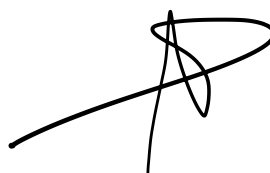
Data: 11/06/2026

O Orientador: Carlos Manuel Lopes Monteiro



Data: 11/06/2026

O Coorientador (se aplicável): Júlia Antunes



Data: 15/06/2026

RESUMO

O esmalte dentário está constantemente sujeito a um equilíbrio dinâmico entre desmineralização e remineralização. A desmineralização ocorre quando o ambiente oral provoca uma queda do pH abaixo do limiar crítico, o que leva à dissolução dos cristais de hidroxiapatita. Se o processo continuar sem reparação, resulta na formação de lesões cariosas. No entanto nem toda a lesão cariosa inicial é irreversível. As lesões não cavitadas podem ser remineralizadas ou estabilizadas. A irreversibilidade está associada à cavitação.

A remineralização baseia-se no retorno dos íons cálcio e fosfato provenientes da saliva, com a eventual participação dos fluoretos para estabilizar a forma mineral (fluoroapatita), menos solúvel.

No entanto, este processo não é simples : existem várias fases intermediárias antes de se atingir uma estrutura semelhante à apatita biológica.

Diversas estratégias de prevenção e promoção da remineralização foram estudadas: o uso de flúor (tópico, dentífricos, vernizes) como agente amplamente reconhecido por favorecer a remineralização e inibir a desmineralização, inclusive reduzindo o limiar crítico; abordagens biomiméticas, como a nano-hidroxiapatita, peptídeos (por exemplo, amelogénina, *leucine-rich amelogenin peptide*), proteínas dentinárias ou extratos naturais, polifosfatos e vidros bioativos.

Técnicas combinadas (flúor + cálcio/fosfato ou flúor + biomiméticos) apresentam melhores resultados na remineralização de lesões iniciais (manchas brancas, erosões superficiais) do que as estratégias simples.

Um aspecto menos estudado, mas crucial, é a comunicação — ou seja, como informar e persuadir os pacientes a adotar comportamentos favoráveis: higiene oral, alimentação adequada, uso regular de flúor, etc. A eficácia das estratégias também depende da compreensão, da adesão, da motivação e das barreiras culturais e sociais. Embora os artigos tratem pouco deste ângulo, alguns enfatizam a importância de campanhas, da educação, do aconselhamento individualizado e do papel do profissional.

Palavras chave : Esmalte, desmineralização, remineralização, prevenção.

ABSTRACT

Dental enamel is constantly subject to a dynamic balance between demineralization and remineralization. Demineralization occurs when the oral environment causes the pH to fall below the critical threshold, leading to the dissolution of hydroxyapatite crystals. If this process continues without repair, it results in the formation of carious lesions. However, not every initial carious lesion is irreversible. Non-cavitated lesions can be remineralized or stabilized. Irreversibility is associated with cavitation.

Remineralization is based on the return of calcium and phosphate ions from saliva, with the possible involvement of fluoride to stabilize the mineral form as fluorapatite, which is less soluble. However, this process is not simple: several intermediate phases occur before a structure similar to biological apatite is achieved.

Various strategies for preventing demineralization and promoting remineralization have been studied. These include the use of fluoride, such as topical fluoride, toothpastes, and varnishes, which is widely recognized for promoting remineralization and inhibiting demineralization, including by lowering the critical pH threshold. Biomimetic approaches have also been investigated, including nano-hydroxyapatite, peptides such as amelogenin and leucine-rich amelogenin peptide, dentin-derived proteins, natural extracts, polyphosphates, and bioactive glasses.

Combined techniques, such as fluoride with calcium and phosphate or fluoride with biomimetic agents, provide better results in the remineralization of initial lesions, including white spot lesions and superficial erosions, than single strategies.

A less studied but crucial aspect is communication, namely how to inform and persuade patients to adopt beneficial behaviours, such as maintaining good oral hygiene, following an appropriate diet, and regularly using fluoride. The effectiveness of these strategies also depends on patients' understanding, adherence, motivation, and cultural and social barriers. Although scientific articles rarely address this aspect, some emphasize the importance of public health campaigns, education, individualized counselling, and the role of dental professionals.

Keywords: *Enamel, demineralization, remineralization, prevention.*

RESUMÉ

L'émail dentaire est constamment soumis à un équilibre dynamique entre déminéralisation et reminéralisation. La déminéralisation se produit lorsque l'environnement buccal entraîne une diminution du pH en dessous du seuil critique, ce qui provoque la dissolution des cristaux d'hydroxyapatite. Si ce processus se poursuit sans réparation, il conduit à la formation de lésions carieuses. Cependant, toute lésion carieuse initiale n'est pas irréversible. Les lésions non cavitaires peuvent être reminéralisées ou stabilisées. L'irréversibilité est associée à la cavitation. La reminéralisation repose sur le retour des ions calcium et phosphate provenant de la salive, avec la participation éventuelle du fluor pour stabiliser la phase minérale sous forme de fluorapatite, moins soluble. Cependant, ce processus n'est pas simple : plusieurs étapes intermédiaires sont nécessaires avant d'aboutir à une structure comparable à l'apatite biologique. Diverses stratégies de prévention et de promotion de la reminéralisation ont été étudiées : l'utilisation du fluor (applications topiques, dentifrices, vernis), largement reconnu pour favoriser la reminéralisation et inhiber la déminéralisation, notamment en abaissant le seuil critique ; des approches biomimétiques telles que la nano-hydroxyapatite, les peptides (par exemple l'amélogénine ou le peptide riche en leucine dérivé de l'amélogénine), les protéines dentinaires ou les extraits naturels, les polyphosphates ainsi que les verres bioactifs. Les approches combinées (fluor + calcium/phosphate ou fluor + agents biomimétiques) montrent de meilleurs résultats pour la reminéralisation des lésions initiales (taches blanches, érosions superficielles) que les stratégies utilisées isolément. Un aspect moins étudié, mais essentiel, est la communication, c'est-à-dire la manière d'informer et de convaincre les patients d'adopter des comportements favorables à la santé bucco-dentaire : hygiène orale, alimentation adaptée, utilisation régulière du fluor, etc. L'efficacité des stratégies dépend également de la compréhension, de l'adhésion, de la motivation ainsi que des barrières culturelles et sociales. Bien que les publications abordent encore peu cet aspect, certaines soulignent l'importance des campagnes de sensibilisation, de l'éducation à la santé, du conseil individualisé et du rôle du professionnel de santé.

Mots-clés : émail, déminéralisation, reminéralisation, prévention.

ÍNDICE GERAL

I.INTRODUÇÃO	17
II.DESENVOLVIMENTO	23
PARTE I: Mecanismos bioquímicos da desmineralização e remineralização	23
1/ Estrutura e composição do esmalte:	23
1.1 Composição mineral e organização estrutural do esmalte:	23
1.2 Estrutura prismática e propriedades mecânicas do esmalte:	25
2/ Desmineralização:	26
2.1 Processo de desmineralização papel das bactérias cariogênicas: .	26
2.2 Erosão dentária e influência dos ácidos alimentares:	27
2.3 Influência do pH das bebidas na hidroxiapatite do esmalte:	30
2.4 Erosão química intrínseca:	32
2.5 Lesões de Manchas brancas opacas :sinais iniciais da desmineralização:	33
2.6 Estudo experimental sobre desmineralização do esmalte:	34
2.6.1 Observação inicial do fragmento dentário:	34
2.6.2 Alterações observadas após exposição ao ácido láctico:	34
2.7 Conceitos de pH crítico, grau de saturação e cinética de dissolução dos cristais:	35
3.2 Papel da saliva na remineralização:	38
3.3 Película adquirida e proteínas salivares:	40
3.4 Capacidade tampão e regulação do pH oral:	40
3.5 Nucleação e formação dos cristais de fosfato de cálcio:	41
3.6 Papel do flúor na remineralização:	42
3.7 Mecanismos de cristalização do fosfato de cálcio e dinâmica da remineralização:	44
PARTE II / Estratégias preventivas e agentes de remineralização:	47
1/ Agentes tradicionais:	47
1.1 Fluor:	47
1.2 Produtos combinados cálcio–fosfato–flúor:	52
2/ Estratégias inovadoras e biomiméticas:	54
2.1 Nano-hidroxiapatita e outros materiais que imitam a estrutura do esmalte:	54

2.2 Peptídeos inspirados em amelogénina e outras proteínas envolvidas na formação do esmalte:.....	55
2.3 Vidros bioativos, polifosfatos e potenciadores de fluoreto:	56
2.4 Extratos naturais com potencial remineralizante ou antibacteriano e agentes moduladores do biofilme:	56
3/ Avaliação e comparação das estratégias de remineralização:.....	57
3.1 Estudos in vitro, in situ e clínicos: diferenças metodológicas:	57
3.2 Principais parâmetros e métodos de avaliação:	58
3.2.1 Microdureza superficial:	58
3.2.2 Microdureza transversal:	60
3.2.3 Microrradiografia transversal:	61
3.2.4 Microtomografia por raios X:	61
3.2.5 Microscopia eletrónica de varrimento:.....	61
3.2.6 Quantificação da perda e ganho mineral:	62
4/ Fatores que influenciam a eficácia das intervenções remineralizantes: 62	
4.1 Frequência, duração e modo de aplicação das terapias:	62
4.2 Características individuais do indivíduo:	63
4.3 Microbiota oral e biofilme dentário:	63
4.4 Interações entre alimentação, flúor e outros iões:	64
1/ Modelos teóricos de comunicação em saúde e mudança de comportamento:	66
1.1 Modelo das crenças em saúde:.....	66
1.2 Modelo transteórico da mudança:	67
1.3 Educação para a saúde:	67
1.4 Fatores socioeconómicos e literacia em saúde:.....	68
2/ Estratégia de comunicação em saúde oral:.....	68
2.1. Comunicação em contexto clínico individual:	69
2.2. Intervenção em meio escolar e comunitário:	69
2.3. Utilização de suportes digitais e tecnologias digitais:	70
2.4. Comunicação adaptada e personalização das mensagens:	71
3/ Barreiras e facilitadores da implementação das estratégias:.....	72
3.1 Barreiras individuais:	73

3.1.a Falta de conhecimentos e baixa literacia em saúde:.....	73
3.1.b Crenças erradas, medo do tratamento e comportamentos de risco:	73
3.1.c Custos e acessibilidade aos cuidados:.....	73
3.2 Barreiras estruturais:.....	74
3.2.a Limitações organizacionais na prática clínica:	74
3.2.b Políticas de saúde e reorganização dos sistemas de cuidados: 74	
3.3 Facilitadores da implementação:	75
3.3.a Políticas públicas favoráveis à prevenção:	75
3.3.b Programas escolares de saúde oral e fluoretação da água:	75
4/ Avaliação do impacto das intervenções de comunicação em saúde oral:	76
4.1 Medição de conhecimentos, atitudes e comportamentos:.....	76
4.2 Correlação com indicadores clínicos e biológicos:	77
4.3 Métodos de recolha de dados:.....	77
4.4 Limitações e desafios da avaliação:	78
PARTE IV / Síntese, recomendações e perspetivas:	78
1/ Recomendação prática:	78
1.1 Para os profissionais de saúde oral:	78
1.2 Para as políticas públicas e programas de saúde:	79
III.CONCLUSÃO	81
IV.BIBLIOGRAFIA	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Imagem de microscopia eletrónica de varrimento do dente mostrando as estrias de Retzius (×50). Fonte: Akasapu A. et al., Journal of Microscopy and Ultrastructure, 2018. Reproduzido sob licença CC BY-NC-SA 4.0.	24
Figura 2: Imagem de microscopia eletrónica de varrimento do dente mostrando detritos acumulados na sua superfície (×50). Fonte: Akasapu A. et al., Journal of Microscopy and Ultrastructure, 2018. Reproduzido sob licença CC BY-NC-SA 4.0.	24
Figura 3: Imagem de microscopia eletrónica de varrimento de uma amostra com (a) detritos e (b) partículas de pó na sua superfície (×3000). Fonte: Akasapu A. et al., Journal of Microscopy and Ultrastructure, 2018. Reproduzido sob licença CC BY-NC-SA 4.0.	25
Figura 4: Imagens de microscopia eletrónica de varrimento dos tipos de prismas do esmalte: (a) prismas superficiais, (b) prismas bem definidos e (c) prismas com microporosidades. Fonte: Akasapu A. et al., Journal of Microscopy and Ultrastructure, 2018.	25
Figura 5: Curvas de pH da placa bacteriana nas superfícies labiais dos dentes anteriores superiores em diferentes grupos de atividade de cárie. Grupo I: sem cárie; Grupo II: atividade de cárie acentuada; Grupo III: ligeira atividade de cárie; Grupo IV:.....	29
Figura 6: dentes antes da remineralização (Instituto Universitário Egas Moniz, 2023)	35
Figura 7: dente depois da remineralização (Instituto Universitário Egas Moniz, 2023)	35
Figure 8: Estrutura da hidroxiapatite: o ião hidroxilo localizado no eixo central c é rodeado por cálcio e fosfatos, bem como por uma estrutura hexagonal de cálcio. (b) Representação do processo de remineralização: ocorre a substituição do ião hidroxilo por um ião fluoreto no centro da molécula (Malcangi et al., 2023).	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Principais proteínas da matriz do esmalte.	24
Tabela 2: Análise dos valores de pH de diferentes bebidas. Dados experimentais pessoais não publicados, Instituto Universitário Egas Moniz, 2023).	31
Tabela 3: Comparação do desempenho da pasta experimental de silicato tricálcico (TCS) com CPP-ACP e SDF-KI em lesões iniciais do esmalte.	51
Tabela 4: Comparação da microdureza superficial do esmalte antes da desmineralização, após desmineralização e após remineralização com diferentes agentes remineralizantes. (Bhavsar et al., 2022) Adaptado de: Comparative assessment of enamel remineralisation on the surface microhardness of demineralized enamel – an in vitro study (2022).	60

INDICE DE SIGLAS

ACP — Fosfato de cálcio amorfo

BAG — Vidro bioativo (Bioactive Glass)

Ca²⁺ — Ião cálcio

CaF₂ — Fluoreto de cálcio

CAO — dentes Cariados, Ausentes e Obturados

CPP — Peptídeo de caseína

CPP-ACP — Peptídeo de caseína–fosfato de cálcio amorfo

CPP-ACPF — Peptídeo de caseína–fosfato de cálcio amorfo com flúor

DALYs—Anos de Vida Ajustados pela Incapacidade (Disability-Adjusted Life Years)

DRGE— Doença do refluxo gastroesofágico

EMP — Proteínas da matriz do esmalte (Enamel Matrix Proteins)

F⁻ — Ião fluoreto

HCA — Apatite hidroxí-carbonatada

HPO₄²⁻ — Ião hidrogenofosfato

H₂PO₄⁻ — Ião dihidrogenofosfato

LRAP — Leucine-Rich Amelogenin Peptide (péptido rico em leucina derivado da amelogenina)

MFP — Monofluorofosfato de sódio

NaF — Fluoreto de sódio

nHAp — Nano-hidroxiapatita

OCP— Fosfato octacálcico

OHL — Literacia em saúde oral

PO₄³⁻ — Ião fosfato

RGE — Refluxo gastroesofágico

SDF — Fluoreto de diamina de prata

SnF₂ — Fluoreto de estanho

TCS— Silicato tricálcico

TMP — Trimetafosfato de sódio

WSL —Lesões de mancha branca (White Spot Lesions)

I. INTRODUÇÃO

O dente constitui uma estrutura complexa composto, do exterior para o interior, por esmalte, dentina e polpa. Graças ao desenvolvimento das tecnologias modernas de análise, a composição química e a organização estrutural dos tecidos dentários têm sido amplamente estudadas nas últimas décadas, permitindo uma melhor compreensão da relação entre a sua estrutura e as suas propriedades mecânicas. Entre estes tecidos, o esmalte dentário apresenta uma resistência notável, capaz de suportar centenas de milhares de ciclos mastigatórios ao longo da vida. No entanto, apesar desta elevada robustez mecânica, os dentes permanecem particularmente sensíveis às agressões químicas provocadas pela exposição repetida a ambientes ácidos, favorecendo assim o desenvolvimento de lesões de cárie (Tang et al., 2023).

A cárie dentária representa atualmente uma das doenças crónicas mais prevalentes à escala mundial. Segundo dados recentes, as cáries em dentes permanentes afetam mais de 2,24 mil milhões de pessoas em todo o mundo, verificando-se variações importantes consoante as regiões geográficas e as características demográficas das populações (Li et al., 2025). Esta patologia afeta homens e mulheres, com um pico de incidência nos jovens adultos entre os 20 e os 24 anos de idade (Li et al., 2025).

A Organização Mundial da Saúde define a cárie dentária como um «processo patológico localizado, de origem externa, que surge após a erupção dentária, acompanhado pelo amolecimento dos tecidos duros e evoluindo para a formação de uma cavidade». Esta doença resulta de um desequilíbrio entre os fenómenos de desmineralização e remineralização dos tecidos dentários, sob a influência de fatores biológicos, ambientais e comportamentais (WHO_TRS_494_fre, n.d.).

Na criança, a cárie dentária e as doenças gengivais figuram entre as patologias orais mais frequentes. O seu aparecimento é influenciado por múltiplos fatores, nomeadamente os hábitos alimentares, a higiene oral, o nível socioeconómico e o acesso aos cuidados de saúde. Os sintomas associados,

como dor, desconforto ou dificuldades funcionais, podem alterar significativamente a qualidade de vida relacionada com a saúde oral, afetando funções essenciais como a alimentação, o sono e o desempenho escolar (Pan et al., 2025).

Os determinantes socioeconómicos desempenham igualmente um papel importante na saúde oral. Estudos recentes evidenciam uma associação consistente entre um baixo estatuto socioeconómico e um maior risco de patologias orais pediátricas. Entre os fatores envolvidos destacam-se o nível de escolaridade parental, o rendimento familiar, a segurança alimentar e as condições de vida do meio envolvente. As desvantagens socioeconómicas precoces podem, assim, ter repercussões duradouras na saúde oral ao longo da vida (Almajed et al., 2024).

Para além das suas consequências clínicas, as doenças orais representam igualmente uma carga económica considerável à escala mundial. O estudo realizado por Yang et al. (2025) avaliou as consequências macroeconómicas das principais patologias orais, nomeadamente as cáries não tratadas, as doenças periodontais e o edentulismo. Esta avaliação considerou não apenas os custos diretos associados aos tratamentos e consultas, mas também as perdas de bem-estar relacionadas com a morbilidade. Utilizando o modelo “Value of Lost Welfare” (VLW), os autores estimaram que as doenças orais representam uma perda económica global superior a 234 mil milhões de dólares, evidenciando a sua importância enquanto problema major de saúde pública (Yang et al., 2025).

As repercussões económicas das doenças orais não se limitam aos custos dos cuidados de saúde. Incluem igualmente custos indiretos relacionados com a diminuição da produtividade, o absentismo escolar ou profissional e a deterioração da qualidade de vida. A utilização de indicadores baseados nos anos de vida ajustados por incapacidade (DALYs) demonstra que estas doenças estão associadas a períodos prolongados de dor, limitações funcionais e

restrições nas atividades quotidianas, contribuindo significativamente para a degradação do bem-estar global das populações (Marcenes et al., 2013)

Além disso, o impacto sanitário e económico das doenças orais varia consoante as regiões do mundo e o nível de desenvolvimento económico dos países. Embora os países de elevado rendimento concentrem as perdas económicas mais importantes em valor absoluto, os países de baixo e médio rendimento suportam uma carga proporcionalmente mais pesada face aos recursos disponíveis. Esta situação evidencia desigualdades persistentes no acesso aos cuidados de saúde oral, bem como nas capacidades dos sistemas de saúde para assegurar uma prevenção eficaz da cárie dentária (Yang et al., 2025).

O esmalte dentário é um tecido mineralizado especializado que reveste a superfície coronária dos dentes, cuja principal função é proteger os tecidos dentários subjacentes contra agressões mecânicas, químicas e biológicas do meio oral (Pandya & Diekwisch, 2021). Constitui o tecido mais mineralizado do corpo humano e apresenta uma organização estrutural altamente especializada.

A formação do esmalte resulta de interações complexas entre uma matriz proteica específica e minerais de fosfato de cálcio. Durante a amelogenese, proteínas como a amelogenina, a ameloblastina e a enamelinina, secretadas pelos ameloblastos, intervêm na organização da nucleação e do alongamento dos cristais de apatite. Este processo, associado a um transporte iónico finamente regulado e à degradação progressiva da matriz orgânica, confere ao esmalte a sua estrutura cristalina característica, bem como as suas propriedades biomecânicas de dureza e resistência (Pandya & Diekwisch, 2021)

Apesar dos numerosos avanços científicos na compreensão dos mecanismos de desmineralização e remineralização do esmalte, vários aspetos permanecem ainda insuficientemente esclarecidos. Embora a ciência tenha permitido identificar o papel dos ácidos bacterianos, do biofilme oral, dos iões minerais e da saliva nestes fenómenos, as interações complexas entre os mecanismos bioquímicos, o microambiente oral e os comportamentos humanos

continuam apenas parcialmente compreendidas. Estas interações influenciam diretamente a eficácia das estratégias preventivas e dos agentes remineralizantes utilizados na prática clínica.

Neste contexto, torna-se necessário adotar uma abordagem integrada que associe as dimensões biológicas, comportamentais e de saúde pública, com o objetivo de otimizar a prevenção da cárie dentária. A compreensão dos mecanismos bioquímicos deve, assim, ser complementada pelo estudo dos fatores comportamentais e das estratégias de comunicação em saúde capazes de melhorar a adesão dos pacientes às medidas preventivas.

O objetivo geral desta tese consiste em compreender, numa perspetiva bioquímica e de saúde pública, os mecanismos de desmineralização e remineralização do esmalte dentário, bem como a forma como estes podem ser modulados através de estratégias preventivas suportadas por uma comunicação eficaz.

Mais especificamente, esta tese pretende analisar os mecanismos bioquímicos envolvidos na desmineralização e remineralização do esmalte, inventariar e avaliar criticamente as diferentes estratégias remineralizantes existentes, nomeadamente as abordagens biomiméticas e os agentes remineralizantes inovadores, assim como explorar o papel da comunicação em saúde e dos comportamentos individuais na eficácia das estratégias preventivas. Finalmente, este trabalho pretende propor recomendações científicas e práticas dirigidas aos profissionais de saúde oral e aos decisores em saúde pública.

A presente dissertação consiste numa revisão narrativa da literatura centrada nos mecanismos de desmineralização e remineralização do esmalte dentário, bem como nas estratégias preventivas e comunicacionais associadas à saúde oral. A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science e Google Scholar, utilizando diferentes combinações dos termos “enamel demineralization”, “enamel remineralization”, “fluoride”, “nano-hydroxyapatite”, “bioactive glass”, “CPP-ACP”, “oral health

communication”, “motivational interviewing” e “oral health literacy”. Foram privilegiados artigos científicos publicados entre 2019 e 2026, incluindo revisões sistemáticas, meta-análises, estudos clínicos e trabalhos experimentais considerados relevantes para os objetivos da investigação.

A dissertação encontra-se organizada em diferentes capítulos. Após a introdução geral, são abordados os fundamentos biológicos e bioquímicos do esmalte dentário e os mecanismos envolvidos na desmineralização e remineralização. Seguidamente, são analisadas as principais estratégias remineralizantes convencionais e inovadoras, incluindo abordagens biomiméticas e agentes bioativos. Posteriormente, é explorado o papel da comunicação em saúde, da literacia em saúde oral e das estratégias comportamentais na prevenção da cárie dentária. Finalmente, são apresentadas a discussão geral, as conclusões e as perspetivas futuras no domínio da prevenção e remineralização do esmalte dentário.

A presente dissertação enquadra-se principalmente no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3 – Saúde de Qualidade, ao abordar estratégias de prevenção da desmineralização dentária e de promoção da remineralização do esmalte, contribuindo para a melhoria da saúde oral e do bem-estar da população. Paralelamente, relaciona-se com o ODS 4 – Educação de Qualidade, uma vez que destaca a importância da educação para a saúde oral, da comunicação eficaz entre profissionais de saúde e pacientes e do desenvolvimento da literacia em saúde como ferramentas fundamentais para a adoção de comportamentos preventivos. Adicionalmente, esta dissertação contribui para o ODS 10 – Redução das Desigualdades, ao salientar a necessidade de garantir o acesso equitativo à informação, à prevenção e aos cuidados de saúde oral, independentemente do contexto socioeconómico dos indivíduos. Desta forma, o presente trabalho reforça o papel da prevenção, da educação e da comunicação na promoção de uma saúde oral mais sustentável e acessível para todos.

II.DESENVOLVIMENTO

PARTE I: Mecanismos bioquímicos da desmineralização e remineralização

1/ Estrutura e composição do esmalte:

1.1 Composição mineral e organização estrutural do esmalte:

O esmalte é o tecido mais mineralizado do dente, sendo composto por cerca de 96% de minerais, principalmente hidroxiapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) que é um fosfato de cálcio cristalino relativamente sensível à dissolução ácida durante as variações de pH causadas pelo metabolismo bacteriano dos hidratos de carbono alimentares (Yeh et al., 2025), 3% de água e 1% de matéria orgânica (amelogeninas, ameloblastinas e enamelinas) ver tabela 1. Esta composição, aliada à sua organização estrutural, confere-lhe propriedades mecânicas e uma resistência excepcionais, permitindo proteger o dente contra forças mecânicas, variações de temperatura e ataques ácidos que pode variar segundo o pH do ácido. O esmalte apresenta uma estrutura complexa, desde a escala nanométrica até à micrométrica. À escala nanométrica, é constituído por nanofios de hidroxiapatite paralelos, com 50–70 nm de largura e 20–35 nm de espessura, que se estendem por vários micrómetros. Estes nanocristais organizam-se para formar prismas de esmalte com cerca de 4–6 μm de diâmetro. Os prismas, juntamente com as zonas interprismáticas, constituem a unidade básica do tecido amelar. (Tang et al., 2023).

Tabela 1: Principais proteínas da matriz do esmalte.

Proteína	Porcentagem (matriz)	Funções
Amelogenina	90%	Regulação da espessura e da orientação dos cristais.
Ameloblastina	5%	Adesão dos ameloblastos à matriz.
Enamelina	2%	Nucleação e alongação dos cristais de hidroxiapatite.

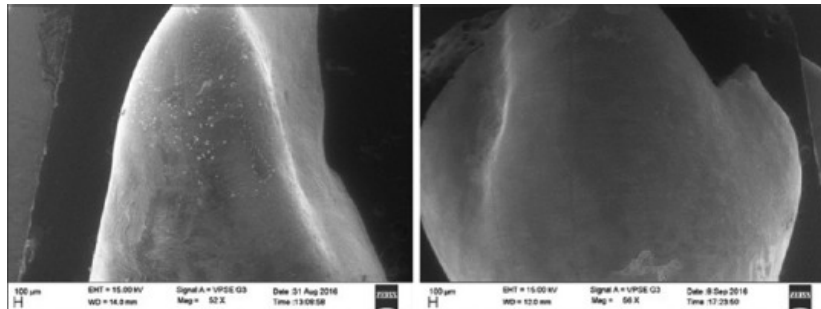


Figura 1: Imagem de microscopia eletrônica de varrimento do dente mostrando as estrias de Retzius ($\times 50$). Fonte: Akasapu A. et al., Journal of Microscopy and Ultrastructure, 2018. Reproduzido sob licença CC BY-NC-SA 4.0.

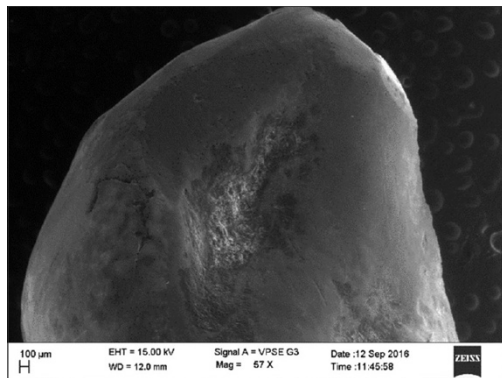


Figura 2: Imagem de microscopia eletrônica de varrimento do dente mostrando detritos acumulados na sua superfície ($\times 50$). Fonte: Akasapu A. et al., Journal of Microscopy and Ultrastructure, 2018. Reproduzido sob licença CC BY-NC-SA 4.0.

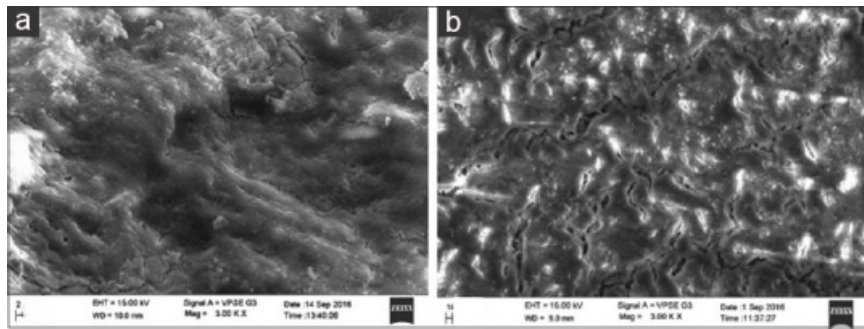


Figura 3: Imagem de microscopia eletrônica de varrimento de uma amostra com (a) detritos e (b) partículas de pó na sua superfície ($\times 3000$). Fonte: Akasapu A. et al., *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 2018. Reproduzido sob licença CC BY-NC-SA 4.0.

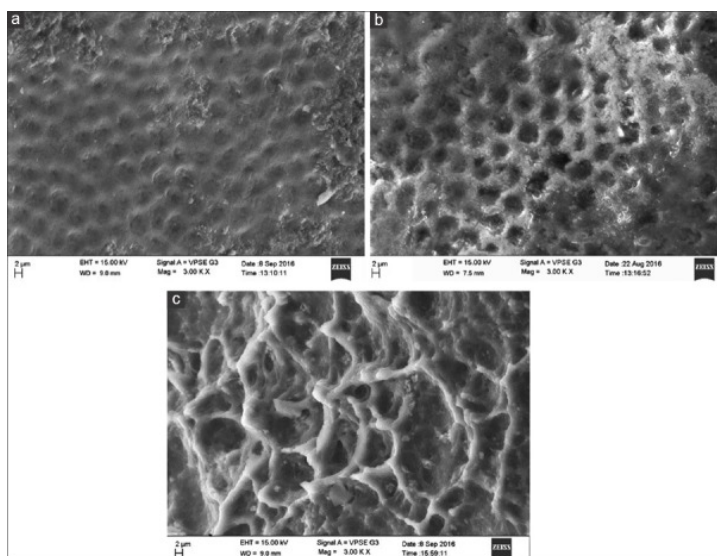


Figura 4: Imagens de microscopia eletrônica de varrimento dos tipos de prismas do esmalte: (a) prismas superficiais, (b) prismas bem definidos e (c) prismas com microporosidades. Fonte: Akasapu A. et al., *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 2018.

1.2 Estrutura prismática e propriedades mecânicas do esmalte:

Entre os prismas e as zonas interprismáticas encontram-se quantidades residuais de proteínas, provenientes da matriz orgânica do esmalte, que formam a bainha do prisma. Esta bainha influencia a resistência mecânica e a dureza do esmalte. A variação da orientação dos prismas ao longo da profundidade do esmalte contribui também para a sua tenacidade: na camada externa, os prismas

são perpendiculares à superfície oclusal e paralelos entre si, enquanto nas camadas internas apresentam uma organização mais curva e entrelaçada. (Tang et al., 2023).

As propriedades mecânicas do esmalte, como a dureza e a elasticidade, variam consoante a posição: o esmalte mais externo apresenta maior dureza e elasticidade, diminuindo progressivamente em direção à junção amelo-dentinária. Estas diferenças estão relacionadas com a composição química local, nomeadamente a proporção de proteínas e a presença de iões inorgânicos como magnésio, carbonato ou fluoreto. As zonas com maior teor proteico, como a bainha dos prismas, apresentam dureza e elasticidade ligeiramente inferiores às dos prismas, o que explica, em parte, as variações mecânicas observadas na cavidade oral. (Tang et al., 2023).

2/ Desmineralização:

2.1 Processo de desmineralização papel das bactérias cariogénicas

A cárie dentária é uma doença multifactorial mediada por biofilme, influenciada pela dieta, pelo hospedeiro, pelo tempo, pela saliva e pelo comportamento, e pode resultar de um processo denominado desmineralização, causado por bactérias cariogénicas capazes de fermentar hidratos de carbono em ácido láctico, que posteriormente desmineraliza o esmalte dentário. A acidez produzida provoca a dissolução da componente inorgânica dos tecidos dentários. Um pH baixo, cerca de 5,5 — inferior ao pH oral saudável (6,8–7) — constitui um indicador de ambiente cariogénico. Quando o pH desce abaixo do valor crítico de 5,5, inicia-se a desmineralização. (Yeh et al., 2025).

A produção excessiva de ácido pode ainda provocar disbiose, favorecendo a colonização por microrganismos patogénicos e a formação de biofilme sobre o esmalte dentário, contribuindo para o aumento da placa bacteriana. O biofilme é um conjunto de bactérias tanto patogénicas quanto não

patogénicas intimamente associadas e envolvidas numa matriz protetora (Ray, 2022).

As espécies responsáveis pela acidificação incluem bactérias altamente acidúricas como *Streptococcus mutans*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Bifidobacterium* e *Scardovia* (Spatafora et al., 2024).

2.2 Erosão dentária e influência dos ácidos alimentares:

A erosão dentária é definida como a perda de tecido duro dentário por um processo químico. Este processo ocorre em várias etapas: inicialmente há um amolecimento do esmalte, cuja duração varia entre indivíduos, dependendo do tipo de ácido e do tempo de exposição. Se a agressão ácida persistir, ocorre a dissolução progressiva das camadas dos prismas de esmalte, levando a uma perda irreversível de tecido. A erosão dentária pode ter causas extrínsecas (como consumo de alimentos e bebidas ácidas) e intrínsecas (como vômitos recorrentes em doentes) (Afonso et al., n.d.).

Um estudo de 2024 sobre os efeitos erosivos das bebidas demonstrou que o consumo frequente de alimentos e bebidas ácidas contribui para a desmineralização do esmalte. Numa amostra de 49 segundos pré-molares, verificou-se que a dureza e a superfície dentária variavam consoante a bebida testada: o café causou uma perda de 8–9% de fosfato, enquanto a Pepsi e o sumo de laranja provocaram perdas próximas de 24%, devido à sua elevada acidez e baixo teor de flúor. O chá preto, apesar de ácido, contém flúor, o que atenua os seus efeitos erosivos (Jameel et al., 2024)

A curva de Stephan é um modelo clássico utilizado em cariologia para ilustrar as variações do pH da placa bacteriana após a ingestão de hidratos de carbono fermentáveis. O seu principal objetivo é demonstrar a relação entre o metabolismo bacteriano dos açúcares e os fenómenos de desmineralização e remineralização do esmalte dentário. Após o consumo de açúcares, as bactérias

cariogénicas presentes no biofilme oral, nomeadamente *Streptococcus mutans*, metabolizam rapidamente estes substratos e produzem ácidos orgânicos, provocando uma diminuição acentuada do pH da placa. Quando o pH desce abaixo do valor crítico para o esmalte, aproximadamente 5,5, inicia-se a dissolução dos cristais de hidroxiapatite, fenómeno designado por desmineralização. Progressivamente, graças à capacidade tampão da saliva e à eliminação dos ácidos, o pH regressa a valores próximos da neutralidade, favorecendo a reposição dos minerais perdidos e a remineralização do esmalte. A curva de Stephan permite, assim, visualizar o equilíbrio dinâmico entre desmineralização e remineralização no meio oral. A repetição frequente destes episódios de acidificação, geralmente associada ao consumo regular de açúcares fermentáveis, pode conduzir a um desequilíbrio persistente a favor da desmineralização e contribuir para o desenvolvimento da lesão de cárie (Bowen, 2013).

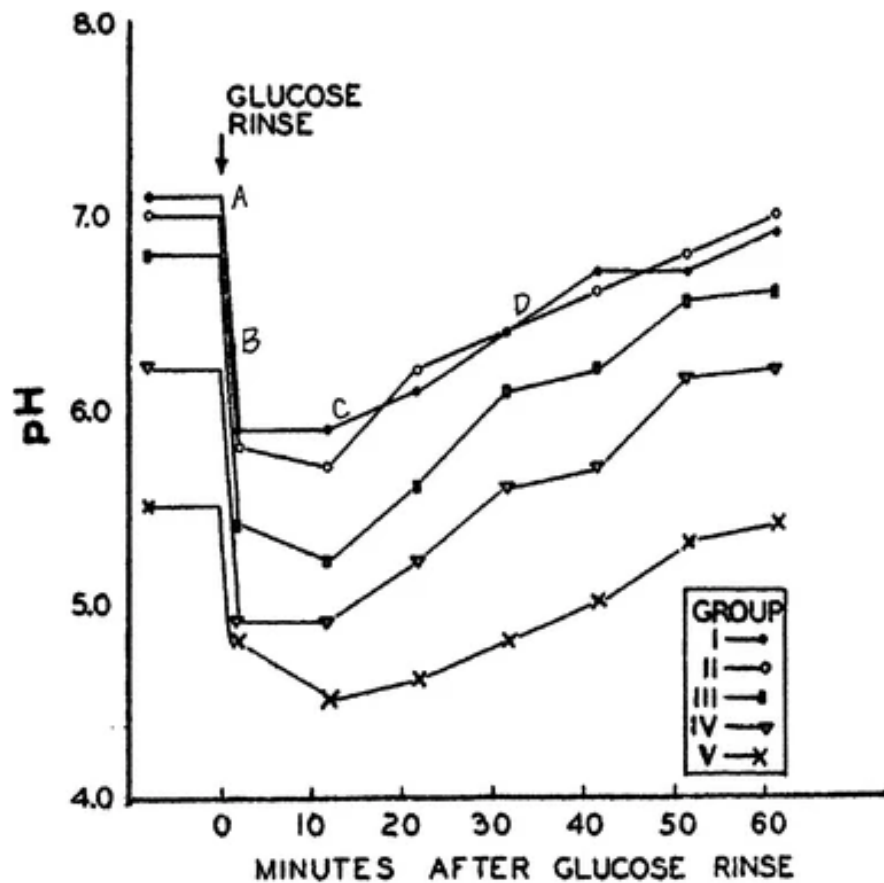


Figura 5: Curvas de pH da placa bacteriana nas superfícies labiais dos dentes anteriores superiores em diferentes grupos de atividade de cárie. Grupo I: sem cárie; Grupo II: atividade de cárie acentuada; Grupo III: ligeira atividade de cárie; Grupo IV.

A Figura 5 ilustra a curva de Stephan, que descreve as alterações do pH da placa bacteriana após a exposição a hidratos de carbono fermentáveis. No ponto A, correspondente à situação basal, o pH da placa encontra-se próximo da neutralidade (cerca de 7,0). Após o bochecho com uma solução de glicose, as bactérias presentes no biofilme oral metabolizam rapidamente os açúcares e produzem ácidos orgânicos, provocando uma descida acentuada do pH (ponto B).

O ponto C corresponde ao valor mínimo de pH atingido alguns minutos após a exposição ao açúcar. Nos indivíduos com maior atividade de cárie, a descida é mais pronunciada e o pH pode atingir valores inferiores ao pH crítico do esmalte

(aproximadamente 5,5), favorecendo a dissolução dos cristais de hidroxiapatite e a consequente desmineralização do tecido dentário.

Posteriormente, devido à ação tampão da saliva e à eliminação progressiva dos ácidos produzidos pelas bactérias, o pH aumenta gradualmente (ponto D), regressando a valores próximos da neutralidade. Esta recuperação favorece os processos de remineralização do esmalte.

A comparação entre os diferentes grupos demonstra que os indivíduos com maior atividade cariogénica apresentam não só uma descida mais acentuada do pH, mas também uma permanência mais prolongada abaixo do pH crítico. Estes resultados evidenciam que o risco de desenvolvimento de lesões de cárie depende da frequência, da intensidade e da duração dos episódios de acidificação da placa bacteriana.

2.3 Influência do pH das bebidas na hidroxiapatite do esmalte:

Foram estudadas e classificadas 380 bebidas. Os grupos incluíram: águas e bebidas desportivas; sumos e bebidas à base de fruta; refrigerantes; bebidas energéticas; chás e café. O pH de cada bebida foi medido em triplicado utilizando um pHmetro, imediatamente após a abertura e a uma temperatura de 25 °C. Os valores de pH foram registados sob a forma de intervalo de variação e média $\pm$ desvio-padrão.

A erosão dentária corresponde a uma perda de substância da estrutura dentária provocada por uma dissolução química, independentemente da atividade bacteriana, quando o meio apresenta uma elevada acidez. Estudos recentes demonstram que o pH constitui o principal fator que influencia o potencial erosivo das bebidas. No entanto, a capacidade dos iões citrato de se ligarem ao cálcio pode também favorecer a erosão, mesmo em valores de pH mais elevados. Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial erosivo de

diferentes bebidas comercializadas através da medição do seu pH (Lussi & Jaeggi, 2008).

Tabela 2: Análise dos valores de pH de diferentes bebidas. *Dados experimentais pessoais não publicados, Instituto Universitário Egas Moniz, 2023).*

BEBIDAS	pH
Água natural	7,4
Água mineral gaseificada Perrier	5,3 ± 0,10
Sumo de tomate Campbell's	4,0 ± 0,01
Sumo de limão	2,3 ± 0,01
Sumo de laranja Minute Maid	3,8 ± 0,01
7up	3,2 ± 0,02
Coca-Cola Classic	2,4 ± 0,03

As bebidas podem ter pH ácido, neutro ou básico, e isso depende das substâncias que contêm. A maior parte das bebidas que consumimos diariamente é ácida, com pH abaixo de 7. Os refrigerantes e muitas bebidas açucaradas são fortemente ácidos ver tabela 2 porque incluem ácidos adicionados, como o ácido cítrico ou fosfórico, que reduzem muito o pH. Os sumos de fruta também são ácidos devido aos ácidos naturais das frutas, enquanto o café e alguns chás são apenas ligeiramente ácidos. A água mantém-se próxima do pH neutro e algumas águas minerais podem ser ligeiramente básicas devido aos seus minerais (Lussi & Jaeggi, 2008).

Esta acidez tem um impacto direto nos dentes porque o esmalte dentário, embora seja muito resistente, pode ser afetado por pH baixo. O esmalte é composto de cristais de hidroxiapatite, que são estruturas minerais muito duras e responsáveis pela força e proteção do dente. Quando o pH é inferior a 5,5, os

ácidos das bebidas começam a reagir com estes cristais, dissolvendo-os lentamente. Este processo é chamado desmineralização (Lussi & Jaeggi, 2008).

Com a contínua exposição a bebidas ácidas, mais cristais de hidroxiapatita são atacados e removidos, enfraquecendo o esmalte.

Com o tempo, esta perda de minerais deixa os dentes mais sensíveis, com maior risco de erosão e desenvolvimento de cáries. Quanto mais ácida for a bebida e quanto mais frequentemente for consumida, mais rápido este desgaste acontece. Por exemplo, refrigerantes com pH entre 2 e 3 são altamente erosivos; sumos de fruta com pH entre 3 e 4 causam erosão moderada; já o café, com pH por volta de 5, provoca erosão leve (Lussi & Jaeggi, 2008)

A água natural, sendo neutra, não causa qualquer dano ao esmalte. Por isso, entender o pH das bebidas e a forma como afetam os cristais de hidroxiapatite é essencial para proteger os dentes e prevenir danos a longo prazo (Lussi & Jaeggi, 2008).

2.4 Erosão química intrínseco:

A erosão dentária pode também ocorrer quando o esmalte é exposto a ácidos não bacterianos, como no refluxo gastroesofágico (RGE). O reflux gastroesofágico (RGE) corresponde à passagem retrógrada do conteúdo gástrico para o esófago, sendo considerado um fenómeno fisiológico quando ocorre ocasionalmente. Quando este refluxo provoca sintomas persistentes ou complicações clínicas, passa a ser designado por doença do refluxo gastroesofágico (DRGE). Em indivíduos com DRGE, o conteúdo gástrico pode atingir a cavidade oral, expondo os dentes ao ácido gástrico, cujo pH é extremamente baixo. Esta exposição repetida favorece a dissolução dos cristais de hidroxiapatite do esmalte dentário e aumenta o risco de erosão dentária. Além da ação direta dos ácidos gástricos, a DRGE pode estar associada a alterações da secreção salivar e da capacidade tampão da saliva, reduzindo os

mecanismos naturais de proteção e remineralização do esmalte. Estudos demonstram que os indivíduos com DRGE apresentam uma prevalência significativamente mais elevada de lesões erosivas dentárias quando comparados com indivíduos sem esta patologia (Y. Li et al., 2022)

As perturbações do comportamento alimentar, nomeadamente a anorexia nervosa e a bulimia nervosa, podem ter repercussões importantes na saúde oral. Entre as manifestações mais frequentemente observadas destacam-se a erosão dentária, a redução do fluxo salivar, as lesões dos tecidos moles e a xerostomia. Na bulimia nervosa, os episódios repetidos de vômito autoinduzido expõem os dentes ao conteúdo gástrico altamente ácido, favorecendo a dissolução progressiva dos cristais de hidroxiapatite do esmalte e o desenvolvimento de erosão dentária. A gravidade destas lesões está geralmente relacionada com a frequência e a duração dos episódios de vômito. Além disso, os doentes com perturbações alimentares apresentam frequentemente uma diminuição do fluxo salivar, reduzindo a capacidade tampão da saliva e comprometendo os mecanismos naturais de remineralização do esmalte. Podem igualmente ocorrer alterações dos tecidos moles, incluindo queilite angular, eritema, ulcerações da mucosa oral e secura labial. Num estudo realizado em Espanha, Garrido-Martínez et al. verificaram que a erosão dentária foi significativamente mais frequente em doentes com perturbações alimentares do que em indivíduos saudáveis, estando também associada a uma maior prevalência de lesões dos tecidos moles e a uma redução significativa do fluxo salivar (Garrido-Martínez et al., 2019)

2.5 Lesões de Manchas brancas opacas :sinais iniciais da desmineralização:

Entre os sinais clínicos precoces das lesões de cárie destacam-se as *white spot lesions* (WLS), que constituem o primeiro sinal visível de desmineralização do esmalte. Apresentam-se como áreas mais opacas do que o esmalte saudável, com aspeto esbranquiçado e textura porosa. Quando

detetadas precocemente, são reversíveis; caso contrário, podem evoluir para lesões cavitadas. As WLS podem ser classificadas como ativas (aspeto rugoso e opaco) ou inativas (aspeto liso e brilhante) (Malcangi et al., 2023).

Deste modo, é essencial implementar estratégias preventivas eficazes e promover a remineralização para reduzir o aparecimento de lesões cariosas.

A desmineralização resulta de ataques ácidos (por exemplo, alimentos e bebidas), enquanto a remineralização natural é promovida pela saliva, que contribui para a reposição mineral do esmalte. Estes dois processos mantêm-se em equilíbrio ao longo da vida; contudo, quando os ataques ácidos predominam, ocorre formação de WLS e, posteriormente, lesões cavitadas, levando a perda irreversível de minerais dentários. (Enax et al., 2024).

2.6 Estudo experimental sobre desmineralização do esmalte:

2.6.1 Observação inicial do fragmento dentário:

Antes da desmineralização, o esmalte apresenta-se íntegro, duro, liso e translúcido, refletindo a elevada organização dos cristais de hidroxiapatita e o seu elevado conteúdo mineral. A superfície mantém-se homogénea e sem defeitos visíveis, apresentando uma microdureza elevada, característica de um esmalte saudável e resistente às agressões químicas (Satou & Sugihara, 2024).

Após a exposição prolongada a um meio ácido, ocorrem alterações estruturais associadas à dissolução parcial da hidroxiapatita (Satou & Sugihara, 2024).

2.6.2 Alterações observadas após exposição ao ácido láctico:

A perda progressiva de minerais provoca uma diminuição significativa da dureza do esmalte, o aparecimento de defeitos superficiais e um aumento da rugosidade da superfície. Visualmente, o esmalte tende a perder a sua translucidez natural, adquirindo um aspeto mais opaco e esbranquiçado devido ao aumento da porosidade e à alteração da forma como a luz atravessa a

estrutura dentária. Estas modificações refletem o processo de desmineralização e demonstram que a ação dos ácidos compromete progressivamente a integridade mecânica e estrutural do esmalte dentário (Satou & Sugihara, 2024).

Observamos o dente. Ele tem manchas moles e uma pequena película branca que descasca quando riscada. O esmalte ficou branco opaco. Estas alterações indicam que ocorreu um processo de desmineralização, no qual o ácido dissolveu parcialmente os cristais de hidroxiapatita do esmalte. Como consequência, a superfície tornou-se menos dura, mais rugosa e menos translúcida, porque a luz já não atravessa os cristais de forma uniforme (Satou & Sugihara, 2024).

Estas são características típicas de um esmalte quimicamente degradado.

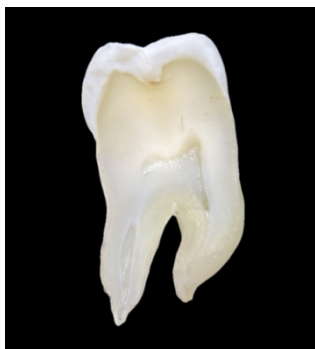


Figura 6: dentes antes da remineralização (Instituto Universitário Egas Moniz, 2023)

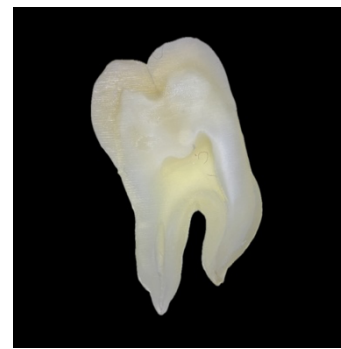


Figura 7: dente depois da remineralização (Instituto Universitário Egas Moniz, 2023)

2.7 Conceitos de pH crítico, grau de saturação e cinética de dissolução dos cristais:

A desmineralização do esmalte dentário depende diretamente das condições químicas do meio oral, particularmente do pH, do grau de saturação dos iões minerais e da cinética de dissolução dos cristais de hidroxiapatite. Estes conceitos são fundamentais para perceber o equilíbrio entre perda e ganho mineral na superfície dentária (Enax et al., 2024).

O conceito de pH crítico corresponde ao valor de pH abaixo do qual a saliva e o biofilme deixam de estar supersaturados em relação à hidroxiapatite, favorecendo assim a dissolução mineral do esmalte. Para a hidroxiapatite, este valor situa-se geralmente em 5,5, embora possa variar em função da composição salivar, da concentração de flúor e da presença de outros iões no meio oral. Quando o pH desce abaixo deste valor, os cristais de apatite tornam-se imediatamente instáveis e começam a dissolver-se progressivamente (Enax et al., 2024).

A dissolução da hidroxiapatite ocorre devido ao aumento da concentração de iões hidrogénio (H^+) no meio oral. Estes iões reagem com os grupos fosfato presentes nos cristais, deslocando o equilíbrio químico e promovendo a libertação de cálcio e fosfato para a saliva e para o biofilme. Quanto mais baixo for o pH, maior será a velocidade de dissolução dos cristais e mais intensa será a perda mineral do esmalte (Farooq & Bugshan, 2020)

O grau de saturação representa a relação entre a concentração de iões cálcio e fosfato presentes na saliva e a concentração necessária para manter a estabilidade da hidroxiapatite. Quando a saliva se encontra saturada relativamente à hidroxiapatite, favorece-se a remineralização. Pelo contrário, em situação de subsaturação, predominam os fenómenos de dissolução mineral. Assim, o equilíbrio entre desmineralização e remineralização depende diretamente das variações locais do grau de saturação induzidas pelas alterações de pH (Farooq & Bugshan, 2020).

A cinética de dissolução dos cristais depende do pH, mas também de fatores como o tempo de exposição aos ácidos, a difusão dos iões no biofilme e a composição química do esmalte. Cristais contendo carbonato apresentam maior solubilidade e dissolvem-se mais rapidamente em meio ácido, enquanto a presença de flúor reduz a solubilidade cristalina e aumenta a resistência do esmalte à desmineralização. Além disso, a dissolução não ocorre de forma homogénea, sendo inicialmente mais intensa nas regiões interprismáticas, devido à sua maior permeabilidade (Tang et al., 2023).

2.8 Papel da placa bacteriana, estrutura do biofilme e microambiente local:

A placa bacteriana corresponde a um biofilme microbiano organizado que se forma naturalmente na superfície dos dentes. Embora muitas vezes seja associada apenas à cárie, trata-se na realidade de um ecossistema complexo, onde milhões de microrganismos interagem entre si e com o ambiente oral. É precisamente esta organização que desempenha um papel central no desenvolvimento das lesões de cárie, ao criar um microambiente capaz de manter um pH ácido junto ao esmalte durante períodos prolongados.

A placa bacteriana corresponde a um biofilme microbiano que se forma naturalmente sobre as superfícies dentárias. Este biofilme é constituído por comunidades de microrganismos organizadas numa matriz extracelular produzida pelas próprias bactérias. A estrutura tridimensional do biofilme permite a adesão dos microrganismos à superfície dentária e favorece a sua persistência no meio oral (Koo et al., 2013).

A matriz extracelular é um componente fundamental do biofilme cariogénico, contribuindo para a organização da comunidade microbiana e para a retenção dos produtos do metabolismo bacteriano. Esta matriz participa na formação de microambientes locais distintos no interior do biofilme, onde podem ocorrer variações nas condições físico-químicas (Koo et al., 2013)

Após a ingestão de hidratos de carbono fermentáveis, os microrganismos presentes no biofilme metabolizam rapidamente estes substratos e produzem ácidos orgânicos. A acumulação destes ácidos conduz à diminuição do pH junto à superfície dentária, favorecendo a desmineralização do esmalte. A atividade acidogénica do biofilme desempenha, assim, um papel importante no desenvolvimento das lesões de cárie (Kornsombut et al., 2024).

Entre os microrganismos associados ao biofilme cariogénico destaca-se *Streptococcus mutans*, devido à sua capacidade de formar biofilme, produzir ácidos e sobreviver em ambientes ácidos. Estas características contribuem para

a progressão das lesões iniciais de desmineralização do esmalte (Kornsombut et al., 2024).

O desenvolvimento da cárie dentária resulta da interação entre o biofilme, os substratos fermentáveis presentes na dieta e os tecidos dentários. Por este motivo, a compreensão da estrutura e do funcionamento do biofilme é fundamental para o desenvolvimento de estratégias preventivas destinadas a reduzir a desmineralização do esmalte e controlar a progressão da doença cárie (Kornsombut et al., 2024).

3/ Remineralização natural:

3.1 Conceito de remineralização natural:

A remineralização pode ser dividida em dois tipos: natural e não natural. A remineralização natural, é um processo essencial que contrabalança continuamente a desmineralização. Consiste na deposição de fosfato de cálcio na superfície do esmalte, contribuindo para a sua integridade e dureza ao longo da vida. Pode também melhorar parcialmente a superfície ou a resistência de áreas hipomineralizadas na correção de alterações do desenvolvimento dentário, como a hipomineralização. (Enax et al., 2024).

3.2 Papel da saliva na remineralização:

A saliva desempenha um papel fundamental na manutenção da saúde oral e constitui um dos principais mecanismos naturais de defesa contra a desmineralização dentária. É um fluido secretado por três glândulas salivares maiores (parótida, submandibular e sublingual) e por numerosas glândulas salivares menores distribuídas pela cavidade oral. Em condições fisiológicas, um adulto produz aproximadamente entre 0,5 e 1,5 litros de saliva por dia, embora este valor possa variar em função da idade, do estado de hidratação, do ritmo circadiano e de determinadas condições sistémicas (Enax et al., 2024).

A saliva é constituída maioritariamente por água, mas contém igualmente diversos componentes orgânicos e inorgânicos essenciais para a proteção dos tecidos dentários. Entre os constituintes inorgânicos destacam-se os iões cálcio, fosfato, bicarbonato, sódio, potássio e fluoreto. Os componentes orgânicos incluem proteínas, glicoproteínas, enzimas e peptídeos antimicrobianos que participam na manutenção da homeostase oral (Farooq & Bugshan, 2020).

Uma das funções mais importantes da saliva é a manutenção de um meio supersaturado em relação aos minerais do esmalte dentário. Em condições normais, a saliva contém concentrações de cálcio e fosfato suficientes para manter o equilíbrio mineral da superfície dentária. Após um episódio de acidificação, quando ocorre perda de minerais do esmalte, estes iões podem ser novamente depositados na estrutura dentária, contribuindo para os processos naturais de remineralização (Enax et al., 2024).

Além de fornecer os minerais necessários à remineralização, a saliva exerce uma ação de limpeza mecânica sobre as superfícies orais. O fluxo salivar contribui para a remoção de restos alimentares e para a eliminação de açúcares fermentáveis, reduzindo a disponibilidade de substratos para o metabolismo bacteriano. Desta forma, a saliva ajuda a limitar a produção de ácidos no biofilme dentário e a reduzir o risco de desmineralização (Farooq & Bugshan, 2020).

A importância da saliva torna-se particularmente evidente em situações de hipossalivação. Nestes casos, a diminuição do fluxo salivar reduz a disponibilidade de cálcio e fosfato, compromete os mecanismos de limpeza oral e diminui a capacidade de recuperação após desafios ácidos. Como consequência, verifica-se um aumento significativo da suscetibilidade à desmineralização, à erosão dentária e ao desenvolvimento de lesões de cárie (Farooq & Bugshan, 2020).

Assim, a saliva não atua apenas como um fluido lubrificante, mas como um sistema biológico complexo que participa ativamente na preservação da integridade mineral do esmalte, constituindo um elemento indispensável para os processos naturais de remineralização dentária (Farooq & Bugshan, 2020).

3.3 Película adquirida e proteínas salivares:

A saliva constitui um dos principais fatores de proteção contra a erosão dentária. A sua ação protetora exerce-se através da formação da película adquirida, uma camada orgânica livre de bactérias que recobre os tecidos orais, composta por glicoproteínas, proteínas e enzimas. (Afonso et al., n.d.).

Proteínas salivares como proteínas ricas em prolina, histatinas e estaterinas interagem com íons cálcio e fosfato, regulando a nucleação e o crescimento dos cristais, evitando crescimento descontrolado e influenciando a composição da película adquirida. (Enax et al., 2024).

A saliva também dilui os ácidos presentes na cavidade oral e facilita a sua eliminação através da deglutição. Além disso, possui capacidade tampão, neutralizando ácidos alimentares. (Afonso et al., n.d.).

3.4 Capacidade tampão e regulação do pH oral:

A capacidade tampão da saliva desempenha um papel fundamental na manutenção do pH oral estável, contribuindo para a neutralização da acidez. Existem três sistemas tampão principais: o sistema bicarbonato (o mais importante), o sistema fosfato e o sistema proteico. A atividade da urease também contribui para a manutenção de um pH neutro. (Farooq & Bugshan, 2020).

A atividade da urease constitui um mecanismo complementar de regulação do pH no biofilme oral. Determinadas bactérias da cavidade oral produzem esta enzima, que catalisa a hidrólise da ureia presente na saliva, originando amónia e dióxido de carbono. A amónia produzida contribui para a neutralização dos ácidos acumulados no biofilme, promovendo um aumento do pH local. Este mecanismo de produção de álcalis ajuda a contrariar a acidificação resultante do metabolismo dos hidratos de carbono fermentáveis e contribui para

a manutenção de um ambiente menos favorável ao desenvolvimento da cárie dentária (Liu et al., 2012).

3.5 Nucleação e formação dos cristais de fosfato de cálcio:

A cristalização do esmalte é um processo complexo. Para simplificar, pode ser inicialmente compreendido através da cristalização do fosfato de cálcio *in vitro*, na ausência de outros componentes orais (Enax et al., 2024).

A formação de cristais não ocorre automaticamente, mesmo em condições de supersaturação de íons cálcio e fosfato. É necessário um processo inicial de nucleação, no qual pequenos agregados iônicos se formam e servem de núcleo para o crescimento cristalino. Após esta etapa, outros íons cálcio e fosfato depositam-se progressivamente sobre estes núcleos, permitindo o crescimento dos cristais (Enax et al., 2024).

Os íons fosfato presentes na saliva podem existir sob diferentes formas químicas, nomeadamente H_2PO_4^- (dihidrogenofosfato), HPO_4^{2-} (hidrogenofosfato) e PO_4^{3-} (fosfato). A distribuição destas espécies depende do pH do meio. Em condições mais ácidas predominam as formas protonadas H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} , enquanto em meios mais alcalinos aumenta a proporção de PO_4^{3-} . Estas diferentes formas químicas participam nos fenómenos de dissolução e precipitação dos fosfatos de cálcio, influenciando a formação e estabilidade dos cristais (Dorozhkin, 2009).

Existem diferentes fases de fosfato de cálcio com solubilidades e cinéticas de formação distintas. Entre elas destacam-se o fosfato de cálcio amorfo (ACP), o fosfato octacálcico (OCP) e a hidroxiapatite. Algumas destas fases são transitórias e podem transformar-se progressivamente em estruturas mais estáveis. A hidroxiapatite constitui a fase cristalina predominante no esmalte dentário e representa o produto final mais estável deste processo de cristalização (Dorozhkin, 2009).

Quanto maior for a disponibilidade de íons cálcio e fosfato e mais favoráveis forem as condições físico-químicas do meio, maior será a probabilidade de ocorrer precipitação mineral e crescimento dos cristais. Estes fenômenos constituem a base dos processos naturais de remineralização do esmalte dentário (Dorozhkin, 2009)

3.6 Papel do flúor na remineralização:

Em pH fisiológico, a saliva encontra-se saturada em cálcio e fosfato. Durante ataques ácidos, o pH diminui e essa saturação é comprometida, promovendo a desmineralização. O flúor presente na saliva, embora em pequenas quantidades, desempenha um papel importante ao incorporar-se nos tecidos dentários e favorecer a remineralização, reduzindo a incidência de cáries. (Farooq & Bugshan, 2020).

Em meio oral, os íons fluoreto podem incorporar-se na estrutura cristalina da hidroxiapatite, substituindo parcialmente os grupos hidroxilo (OH^-) e originando fluorapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$). Esta substituição resulta numa estrutura cristalina mais estável e menos solúvel em meio ácido.

O flúor promove a formação de fluorapatite, aumentando a resistência do esmalte e favorecendo a cristalização do fosfato de cálcio. (Enax et al., 2024).

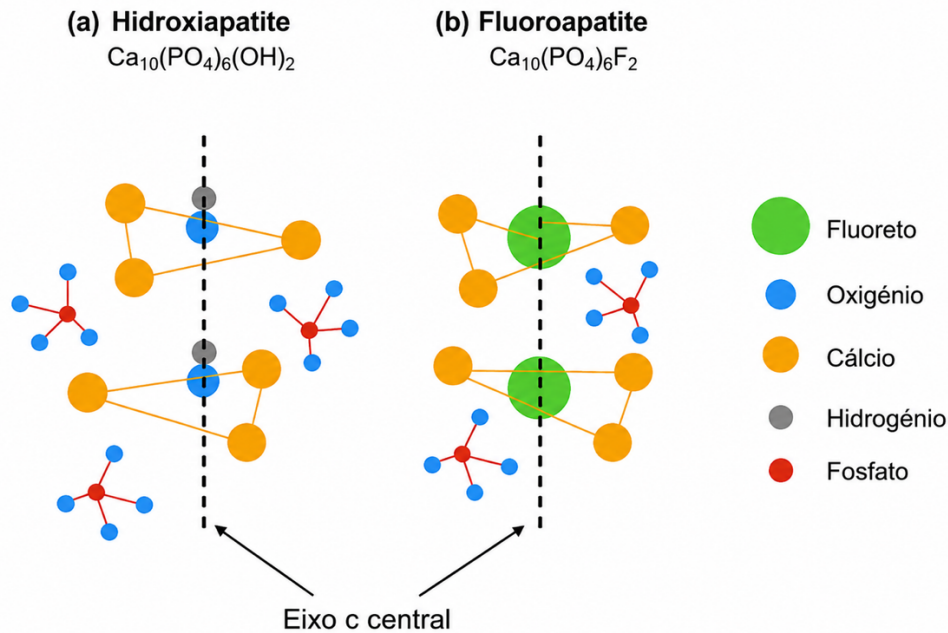


Figura 8: Estrutura da hidroxiapatite: o íon hidroxila localizado no eixo central c é rodeado por cálcio e fosfatos, bem como por uma estrutura hexagonal de cálcio. (b) Representação do processo de remineralização: ocorre a substituição do íon hidroxila por um íon fluoreto no centro da molécula (Malcangi et al., 2023). (CC BY) license.

O esmalte dentário é composto principalmente por hidroxiapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), que corresponde à forma cristalina de fosfato de cálcio predominante e mais estável nos tecidos dentários. Embora existam outras fases de fosfato de cálcio, como o fosfato de cálcio amorfo (ACP) e o fosfato octacálcico (OCP), a hidroxiapatite constitui o principal componente mineral do esmalte e é responsável pelas suas propriedades mecânicas e pela sua resistência à dissolução. Quando os íons fluoreto estão presentes, podem substituir parcialmente os grupos hidroxila da hidroxiapatite, conduzindo à formação de fluoroapatite, uma fase que apresenta maior estabilidade do que a hidroxiapatite pura (Dorozhkin, 2009).

Do ponto de vista químico, a incorporação de íons fluoreto na estrutura da hidroxiapatite reduz a sua solubilidade e favorece a formação de uma fase mineral mais resistente aos ácidos. Consequentemente, o pH crítico de dissolução é inferior ao da hidroxiapatite, o que significa que estruturas enriquecidas em fluoreto apenas se dissolvem em condições de acidez mais

intensa. Esta propriedade aumenta significativamente a resistência do esmalte aos desafios ácidos de origem bacteriana ou alimentar (Yeh et al., 2025).

Para além deste efeito estrutural, o flúor favorece igualmente a remineralização ao facilitar a precipitação dos iões cálcio e fosfato presentes na saliva. Atua como um catalisador da formação de novos cristais e acelera a reparação das lesões iniciais do tipo WSL (Farooq & Bugshan, 2020).

Estudos recentes demonstram também que o flúor favorece a formação de depósitos de fluoreto de cálcio (CaF_2) à superfície do esmalte, desempenhando um papel de reservatório de iões fluoreto. Estes depósitos permitem uma libertação progressiva do flúor durante os episódios de diminuição do pH, prolongando assim o seu efeito protetor (Hamdi et al., 2022).

Assim, o flúor atua simultaneamente como agente preventivo e remineralizante, reforçando a estrutura cristalina do esmalte e modulando a dinâmica dos processos de dissolução e reconstituição mineral (Enax et al., 2024)

3.7 Mecanismos de cristalização do fosfato de cálcio e dinâmica da remineralização:

A remineralização do esmalte dentário corresponde a um processo dinâmico de recuperação mineral que ocorre naturalmente na cavidade oral. Este fenómeno depende principalmente da disponibilidade de iões cálcio (Ca^{2+}) e fosfato (PO_4^{3-}) na saliva, bem como das condições químicas locais, nomeadamente o pH e o grau de saturação mineral. Durante este processo, os minerais dissolvidos durante a desmineralização podem voltar a ser incorporados na estrutura do esmalte através de mecanismos de nucleação, crescimento cristalino e deposição mineral. A presença de fluoreto pode ainda favorecer a formação de fases minerais mais resistentes à dissolução ácida. Estes mecanismos contribuem para a recuperação parcial das lesões iniciais de

desmineralização e para a manutenção da integridade estrutural do esmalte dentário (Enax et al., 2024).

O processo inicia-se por uma fase de nucleação cristalina. Embora a saliva esteja frequentemente supersaturada relativamente à hidroxiapatite, os cristais não se formam espontaneamente. É necessária uma etapa inicial de formação de pequenos agregados iónicos, denominados núcleos de cristalização, que servem de suporte ao desenvolvimento dos cristais minerais. Durante esta fase surgem inicialmente fases metaestáveis de fosfato de cálcio, nomeadamente o ACP, o OCP e alguns fosfatos tricálcicos transitórios. Estas fases apresentam elevada solubilidade e constituem precursores da apatite biológica madura. Progressivamente, reorganizam-se para formar cristais de hidroxiapatite mais estáveis e menos solúveis (Enax et al., 2024).

A remineralização do esmalte segue os mesmos princípios químicos da cristalização do fosfato de cálcio; contudo, este fenómeno é significativamente mais complexo na cavidade oral devido à presença de proteínas salivares, como as estaterinas, as histatinas e as proteínas ricas em prolina, bem como de outros componentes salivares, nomeadamente os iões bicarbonato, cálcio, fosfato e fluoreto. Estes constituintes influenciam a nucleação, o crescimento cristalino e a estabilidade dos minerais formados durante a remineralização (Farooq & Bugshan, 2020).

O pH desempenha igualmente um papel essencial na cristalização. Em meio ácido, o aumento da concentração de iões hidrogénio favorece a dissolução da hidroxiapatite. Pelo contrário, quando o pH regressa a valores próximos da neutralidade, a saliva volta a encontrar-se supersaturada em cálcio e fosfato, favorecendo a precipitação mineral e o crescimento cristalino. Assim, o equilíbrio entre desmineralização e remineralização depende diretamente das variações do pH oral (Farooq & Bugshan, 2020).

As estaterinas, histatinas e proteínas ricas em prolina regulam a nucleação e o crescimento dos cristais, impedindo uma precipitação mineral

descontrolada. Estas biomoléculas estabilizam temporariamente as fases amorfas do fosfato de cálcio e controlam a orientação dos cristais durante a remineralização (Farooq & Bugshan, 2020).

Como referido anteriormente, o flúor exerce uma ação fundamental durante a cristalização mineral. Quando está presente na saliva ou é aplicado topicamente, incorpora-se nos cristais de hidroxiapatite através da substituição parcial dos grupos hidroxilo (OH^-), formando fluorapatite. Esta estrutura apresenta menor solubilidade e maior resistência aos ataques ácidos do que a hidroxiapatite convencional. Além disso, o flúor acelera a precipitação mineral e favorece a formação de cristais maiores e mais estáveis, aumentando assim a resistência do esmalte face à desmineralização futura (Enax et al., 2024).

O flúor favorece a remineralização ao promover a nucleação e o crescimento de novos cristais de fosfato de cálcio, facilitando a incorporação dos iões cálcio e fosfato na estrutura do esmalte. Simultaneamente, reduz a solubilidade dos cristais minerais formados, tornando-os mais resistentes à dissolução ácida (Farooq & Bugshan, 2020).

PARTE II / Estratégias preventivas e agentes de remineralização:

1/ Agentes tradicionais:

1.1 Fluor:

Para evitar a desmineralização explicada anteriormente, existem meios de prevenção e meios de remineralização do esmalte dentário. Nomeadamente, contamos com o flúor, que continua a ser o agente de referência para a prevenção e a remineralização. O flúor faz parte dos halogéneos e os seus iões são considerados reativos, apresentando uma grande rapidez de ação. Os fluoretos inorgânicos mais comuns são o fluoreto de sódio (NaF), o fluoreto de estanho (SnF₂), o fluoreto de cálcio (CaF₂) e o monofluorofosfato de sódio. Ele desempenha um papel crucial na prevenção das cáries dentárias. O seu efeito anticariogénico é obtido através da redução das bactérias cariogénicas, interferindo com a atividade enzimática bacteriana e reduzindo assim a produção de ácido no biofilme dentário. Promove a melhoria da resistência do esmalte ao favorecer a remineralização através da incorporação de iões fluoreto nos cristais de hidroxiapatite, formando fluorapatite, que apresenta maior resistência à dissolução ácida (Dobrzyński et al., 2025). A incorporação do flúor nos locais cristalinos que já podem ter sido fragilizados por lesões iniciais de cárie vai facilitar a nucleação de novos depósitos minerais, reforçando a superfície do esmalte onde a desmineralização já se iniciou (Dobrzyński et al., 2025).

Ao longo das últimas décadas, numerosos produtos foram desenvolvidos para uso pessoal e profissional com o objetivo de prevenir a cárie dentária. A escolha da aplicação depende de vários fatores, nomeadamente a idade do paciente, o risco de cárie — uma vez que cada indivíduo apresenta um risco diferente, também o nível de exposição ao flúor no ambiente oral (Yeh et al., 2025).

Entre os diferentes produtos fluoretados disponíveis, encontramos o dentífrico fluoretado, que continua a ser o meio mais acessível e mais simples, sendo por isso amplamente utilizado na prevenção da cárie. Os dentífricos normais contêm geralmente entre 1000 ppm e 1500 ppm de flúor, fornecidos por

compostos como o fluoreto de sódio, o fluoreto de estanho ou o monofluorofosfato de sódio. Estas formulações promovem eficazmente a remineralização e inibem o processo de desmineralização. Para crianças com menos de 6 anos, a concentração de flúor é um pouco mais baixa, entre 500 e 1000 ppm. Estas concentrações são reduzidas nas crianças para evitar a fluorose dentária, uma vez que muitas podem engolir o dentífrico durante a escovagem. Existem também dentífricos com elevada concentração de flúor, cerca de 5000 ppm, indicados para pessoas com alto risco de cárie dentária, como portadores de aparelhos ortodônticos ou pessoas que sofrem de xerostomia (Yeh et al., 2025).

Dispomos igualmente de vernizes fluoretados e colutórios fluoretados. Os vernizes fluoretados são agentes tópicos aplicados diretamente na superfície do dente, permitindo libertar elevadas concentrações de flúor diretamente na superfície dentária. O verniz de fluoreto a 5% contém cerca de 22600 ppm de flúor. Este verniz é aplicado diretamente em contacto com o esmalte, permitindo a libertação de iões fluoreto durante várias horas, promovendo assim a remineralização do esmalte e uma diminuição da atividade bacteriana responsável pela cárie dentária. Estudos mostram que uma aplicação 2 a 4 vezes por ano pode reduzir a incidência de cáries em 43% nos dentes permanentes. Os vernizes fluoretados são também adequados para crianças, pois são aplicados por profissionais, o que impede a sua ingestão (Yeh et al., 2025).

A aplicação de verniz fluoretado faz parte das bases mais utilizadas devido a várias vantagens, como a rapidez e facilidade de aplicação.

Os colutórios fluoretados apresentam concentrações de 230 ppm para uso diário e 900 ppm para uso semanal. São eficazes na redução do risco de cárie em pessoas de alto risco, como crianças com aparelho ortodôntico. No entanto, os colutórios não são recomendados para crianças com menos de 6 anos devido ao elevado risco de ingestão e toxicidade (Yeh et al., 2025).

Existem também suplementos de flúor sob a forma de comprimidos ou gotas, utilizados de forma sistêmica em regiões onde a água potável apresenta concentrações insuficientes de flúor. A posologia varia em função da idade, do peso e da exposição ao flúor proveniente de outras fontes. A dose situa-se geralmente entre 0,25 e 1 mg por dia. Quando administrados durante o período de desenvolvimento dentário, estes suplementos podem contribuir para a incorporação de fluoreto na estrutura mineral do esmalte em formação, aumentando a sua resistência à dissolução ácida (Yeh et al., 2025).

Existe igualmente o fluoreto de diamina de prata (SDF) um agente tópico utilizado para interromper lesões cariosas ativas. Trata-se de uma abordagem não invasiva para tratar cáries ativas. Pode ser particularmente interessante em populações com acesso limitado a cuidados restauradores. No entanto, este efeito positivo apresenta uma limitação, nomeadamente a coloração negra que ocorre na lesão cariosa após aplicação, o que pode constituir uma desvantagem estética. Em odontopediatria, o SDF é fortemente recomendado para crianças pequenas não cooperantes com cárie precoce da infância, devido à sua eficácia e facilidade de aplicação (Yeh et al., 2025).

Recentemente, novos materiais bioativos têm vindo a ser desenvolvidos com o objetivo de melhorar a remineralização do esmalte dentário e complementar os agentes fluoretados tradicionais. Entre estes materiais destaca-se uma pasta experimental à base de silicato tricálcico (TCS), que demonstrou resultados promissores na remineralização de lesões iniciais de esmalte. O TCS é capaz de libertar iões cálcio e criar um ambiente favorável à formação de novos depósitos minerais, contribuindo para a recuperação das áreas desmineralizadas. Estudos laboratoriais demonstraram uma melhoria significativa da microdureza do esmalte após a sua aplicação, sugerindo um potencial remineralizante relevante para o tratamento das lesões iniciais de cárie (Hamdi et al., 2022)

Um estudo recente avaliou o potencial remineralizante de uma pasta experimental de silicato tricálcico em comparação com CPP-ACP e SDF-KI em

lesões artificiais de esmalte. Os resultados demonstraram que o silicato tricálcico apresentou capacidade significativa de remineralização, favorecendo a recuperação mineral da superfície dentária e reduzindo a progressão das lesões de cárie iniciais. Os autores observaram igualmente melhorias na microdureza do esmalte após a aplicação do material. Estes resultados sugerem que o silicato tricálcico poderá constituir uma alternativa promissora no desenvolvimento de estratégias biomiméticas de remineralização (Hamdi et al., 2022).

Tabela 3: Comparação do desempenho da pasta experimental de silicato tricálcico (TCS) com CPP-ACP e SDF-KI em lesões iniciais do esmalte.

Parâmetro	Silicato tricálcico (TCS)	CPP-ACP	SDF-KI
Modelo experimental	Lesões artificiais do esmalte	Lesões artificiais do esmalte	Lesões de cárie ativas
Objetivo do estudo	Avaliar o potencial de remineralização	Agente remineralizante de referência	Paragem e estabilização de lesões de cárie
Mecanismo de ação	Libertação de iões Ca^{2+} e OH^- , aumento do pH local, precipitação de fases minerais	Libertação controlada de Ca^{2+} e PO_4^{3-} , estabilização do ambiente mineral	Ação antimicrobiana da prata + formação de depósitos minerais
Efeito na remineralização	Muito significativo (superior aos restantes grupos)	Moderado a elevado	Moderado
Microdureza do esmalte	Aumento significativo da microdureza	Aumento moderado	Estabilização ou ligeira melhoria
Progressão das lesões	Redução importante	Redução moderada	Paragem das lesões ativas
Vantagens	Abordagem biomimética, libertação contínua de iões, elevado potencial regenerativo	Elevada biocompatibilidade, utilização clínica estabelecida	Elevada eficácia na paragem de lesões ativas
Limitações	Dados clínicos ainda limitados, material recente	Dependente da frequência de aplicação	Desvantagem estética (coloração negra)

Apesar destas medidas, a escovagem dentária duas vezes por dia com dentífrico fluoretado continua a ser uma das estratégias mais eficazes na prevenção da cárie dentária em todas as faixas etárias. A presença regular de

flúor na cavidade oral favorece a remineralização das lesões iniciais do esmalte e reduz a sua suscetibilidade à dissolução ácida. Além disso, o flúor promove a formação de estruturas minerais enriquecidas em fluoreto, mais resistentes aos desafios ácidos produzidos pelo metabolismo bacteriano. Estudos clínicos demonstram que a utilização regular de dentífricos contendo mais de 1000 ppm de flúor reduz significativamente a incidência de cárie quando comparada com a utilização de dentífricos sem flúor (Walsh et al., 2019)

Estudos clínicos mostram que a utilização de dentífrico fluoretado contendo mais de 1000 ppm de flúor reduz a incidência de cárie em cerca de 23% comparativamente a um dentífrico sem flúor (Walsh et al., 2019). Um estudo Cochrane demonstrou que a aplicação de verniz fluoretado pode reduzir a incidência de cáries em 37% na dentição decídua e 43% na dentição permanente quando aplicado duas a quatro vezes por ano (Marinho et al., 2013) Outro estudo Cochrane demonstrou que o uso de colutórios fluoretados reduz a incidência de cáries em cerca de 27% nos dentes permanentes (Marinho et al., 2016).

O tratamento das WSL com flúor demonstra uma eficácia significativa, mas pode apresentar alguns riscos de hipermineralização. A introdução de novos agentes com potencial anticariogénico, como o fosfopéptido de caseína (CPP) associado ao ACP, demonstrou efeitos significativos na remineralização (Gonçalves et al., 2025).

1.2 Produtos combinados cálcio–fosfato–flúor:

O CPP-ACP constitui um material biológico derivado da caseína, este sistema estimula a remineralização ao libertar iões cálcio e fosfato na superfície dentária. A caseína é a proteína principal do leite, com elevada capacidade de ligação a iões minerais. O CPP-ACP é um material biológico que funciona através de uma tecnologia em que a caseína se liga à placa bacteriana, impedindo a adesão bacteriana e a formação de biofilme. Este produto promove

a remineralização ao atuar como reservatório de cálcio e fosfato e tem também a capacidade de estabilizar o fosfato de cálcio no estado amorfo, sendo por isso reconhecido pelos seus efeitos anticariogénicos. Quando combinado com flúor, forma CPP-ACPF (Baccolini et al., 2025), apresentando um maior potencial remineralizante devido à formação de uma fase amorfa estabilizada de fosfato de cálcio fluoretado. Assim, quando ocorre uma diminuição do pH, a dissociação do complexo CPP-ACP permite a libertação de iões, impedindo a desmineralização e favorecendo a remineralização ao manter a saturação mineral relativamente ao esmalte dentário (Gonçalves et al., 2025).

A fluorapatite forma-se na presença de flúor após a dissolução da hidroxiapatite, sendo potencialmente benéfica para a superfície dentária, uma vez que apresenta maior resistência aos ataques ácidos. O seu pH crítico é de cerca de 4,5, enquanto o da hidroxiapatite é de 5,5 (Gonçalves et al., 2025).

Os anteriores demonstraram que a adição de trimetafosfato de sódio (TMP) pode reforçar o efeito protetor do flúor no processo de remineralização do esmalte dentário. A sua ação remineralizante está diretamente relacionada com a sua adsorção à superfície dentária, atuando como agente nucleante de cálcio (Ca^{2+}) e contribuindo para a formação de fluoreto de cálcio (CaF_2), facilitando a ligação entre iões e promovendo a remineralização (Gonçalves et al., 2025).

Agora que conhecemos os efeitos remineralizantes destes dois compostos, um estudo avaliou in vitro o efeito da combinação de dentífrico fluoretado (1100 ppm) com 3% de TMP (1100F-TMP), seguido da aplicação de CPP-ACP, na remineralização e desmineralização. Os resultados mostraram melhorias na dureza superficial, profundidade e formação de cálcio e fosfato no esmalte, em comparação com dentífricos contendo apenas 1100 ppm de flúor, constituindo uma alternativa interessante para pacientes de alto risco (Gonçalves et al., 2025).

2/ Estratégias inovadores e biométicas:

Como vimos anteriormente, o fluoreto é utilizado como agente preventivo de remineralização devido à sua capacidade de favorecer a formação de fluorapatite. Além disso, vimos também que o CPP-ACP inibe a desmineralização ao libertar iões cálcio e fosfato em condições de pH baixo. Agora vamos abordar a nano-hidroxiapatite (nHAp), que tem recebido particular atenção nos últimos anos pelas suas aplicações preventivas, terapêuticas e regenerativas.

2.1 Nano-hidroxiapatita e outros materiais que imitam a estrutura do esmalte:

A hidroxiapatite é um mineral utilizado na regeneração óssea, na engenharia de tecidos e no tratamento da hipersensibilidade dentária, para além da sua ação remineralizante. A nHAp sintética foi inicialmente utilizada com fins remineralizantes, mas ganhou maior relevância quando estudos demonstraram que a sua composição estrutural e química é muito semelhante à do esmalte dentário. O esmalte é composto principalmente por cristais de hidroxiapatite com dimensões entre 20 e 40 nm, e a nHAp apresenta uma estrutura semelhante a nível nanométrico. Além disso, é biocompatível e possui bioatividade, reabsorção e propriedades mecânicas superiores à hidroxiapatite convencional (Anil et al., 2022).

A adição de nHAp nos dentífricos tem um efeito positivo na remineralização do esmalte?

Foi demonstrado que a nHAp tem também a capacidade de formar uma nova camada de esmalte, reduzir a sensibilidade dentária e aumentar a resistência à cárie. Observou-se igualmente um aumento da remineralização do

esmalte após descolagem ortodôntica com a aplicação de 10% de nHAp, bem como uma melhor remineralização em dentes decíduos em comparação com dentífricos contendo 1000 ppm de flúor (Anil et al., 2022).

Além disso, a exposição generalizada das crianças ao flúor proveniente de múltiplas fontes levanta preocupações relacionadas com a fluorose, evidenciando a necessidade de estratégias alternativas de remineralização que possam complementar ou melhorar a eficácia do flúor.

2.2 Peptídeos inspirados em amelogenina e outras proteínas envolvidas na formação do esmalte:

Já referimos anteriormente a nHAp, e agora iremos abordar novos agentes como as proteínas da matriz do esmalte (EMP) e os vidros bioativos (BAG). Um desses peptídeos, o peptídeo rico em leucina derivado da amelogenina (LRAP), orienta o crescimento dos cristais de hidroxiapatite, demonstrando também a capacidade de promover a formação de cristais lineares e reduzir a profundidade das lesões, contribuindo para a regeneração do esmalte de forma biomimética (Evaluation_of_synergistic_remineralization_effect.6, n.d.).

A matriz orgânica do esmalte, rica em amelogenina, desempenha um papel importante no controlo do crescimento, forma e organização dos cristais de hidroxiapatite durante a mineralização. O esmalte maturado não consegue regenerar a perda mineral causada pela cárie dentária, uma vez que é acelular, ou seja, carece de proteínas e de matriz orgânica, não sendo capaz de regenerar espontaneamente essas perdas. Recentemente, esta estrutura foi reproduzida através de matrizes sintéticas baseadas em amelogenina. A amelogenina recombinante de origem suína favorece o crescimento cristalino e melhora a dureza e elasticidade do esmalte ao estabilizar agregados de fosfato de cálcio. Outra alternativa é o LRAP sintético, cujo uso no tratamento de lesões reduz a profundidade das mesmas e promove o crescimento linear de cristais maduros, conduzindo a uma reconstrução biomimética do esmalte (Evaluation_of_synergistic_remineralization_effect.6, n.d.).

2.3 Vidros bioativos, polifosfatos e potenciadores de fluoreto:

Os primeiros materiais bioativos, como o 45S5 BAG e o 77S BAG, apresentam elevado índice de bioatividade. Compostos por sódio, cálcio, fósforo e sílica, atuam como materiais biomiméticos. O 45S5 BAG foi identificado como o vidro bioativo com maior capacidade remineralizante sintética, interagindo com ambientes aquosos como a saliva para libertar iões que aumentam o pH e iniciam a formação de apatite hidroxi-carbonatada (HCA), reforçando a superfície dentária e promovendo a remineralização. (Evaluation_of_synergistic_remineralization_effect.6, n.d.).

2.4 Extratos naturais com potencial remineralizante ou antibacteriano e agentes moduladores do biofilme:

Os nanomateriais são materiais com dimensões inferiores a 100 nm, geralmente utilizados sob a forma de nanopartículas. Podem ser de natureza orgânica ou inorgânica e caracterizam-se por uma elevada relação superfície/volume, que lhes confere uma grande reatividade. No contexto da medicina dentária, incluem, entre outros, a nano-hidroxiapatite, as nanopartículas de fosfato de cálcio, de prata e de óxido de zinco. Estes materiais têm demonstrado potencial para interferir com os biofilmes cariogénicos, reduzir a atividade bacteriana, limitar a desmineralização e favorecer os processos de remineralização do esmalte dentário (Evaluation_of_synergistic_remineralization_effect.6, n.d.).

3/ Avaliação e comparação das estratégias de remineralização:

3.1 Estudos in vitro, in situ e clínicos: diferenças metodológicas:

As estratégias de remineralização são avaliadas através de três grandes tipos de modelos experimentais: in vitro, in situ e clínicos. Cada um corresponde a diferentes níveis de evidência científica (Fernando et al., 2024).

Os estudos in vitro constituem a primeira etapa na avaliação de agentes remineralizantes, permitindo um controlo rigoroso das condições experimentais, como o tempo de exposição, ciclos ácidos e composição das soluções. Estes estudos utilizam frequentemente lesões artificiais para testar a eficácia de novos agentes antes da sua avaliação clínica (Hamdi et al., 2022)

No entanto, apresentam limitações, pois não reproduzem fielmente as condições da cavidade oral, como a presença de saliva, variações de pH ou atividade do biofilme bacteriano. Por essa razão, foram desenvolvidos modelos in situ, que aproximam as condições experimentais da realidade. Estes consistem geralmente na colocação de amostras de esmalte com lesões em dispositivos intraorais utilizados por voluntários, sendo expostos à saliva e às flutuações de pH. Recomenda-se o uso destes dispositivos durante 14 dias consecutivos. Após cada fase, os blocos de esmalte são comparados com controlos para avaliar a microdureza superficial e a eficácia dos tratamentos (Fernando et al., 2024).

Os ensaios clínicos randomizados representam o nível mais elevado de evidência para a avaliação da eficácia dos agentes remineralizantes, uma vez que permitem observar diretamente a evolução das lesões cáries em pacientes submetidos a diferentes tratamentos. Estes estudos possibilitam avaliar a eficácia clínica dos materiais em condições reais de utilização e determinar o seu impacto na prevenção e tratamento das lesões iniciais de cárie (Wan Hassan et al., 2025).

Num ensaio clínico randomizado com duração de 12 meses realizado em pacientes portadores de aparelhos ortodônticos fixos, observou-se uma redução

significativa das lesões iniciais de cárie após a utilização de protocolos remineralizantes à base de flúor. Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação de verniz fluoretado, seguindo-se o CPP-ACPF, demonstrando a capacidade destes agentes para promover a remineralização das lesões de esmalte pós-ortodônticas (Wan Hassan et al., 2025).

Assim, a combinação dos modelos in vitro, in situ e clínicos é essencial para compreender a eficácia real dos agentes remineralizantes, sendo que os estudos laboratoriais permitem compreender os mecanismos fundamentais, os modelos in situ reproduzem o ambiente da cavidade oral e os ensaios clínicos permitem determinar a eficácia real das intervenções na prática dentária (Hamdi et al., 2022),

3.2 Principais parâmetros e métodos de avaliação:

A avaliação da eficácia das estratégias de remineralização baseia-se em métodos quantitativos e qualitativos que permitem medir as modificações estruturais, mecânicas e químicas do esmalte. Estas técnicas possibilitam observar a remineralização em diferentes escalas.

3.2.1 Microdureza superficial:

A medição da microdureza constitui um indicador de alto nível para avaliar a remineralização do esmalte, refletindo rapidamente as modificações mecânicas decorrentes do ganho mineral após o tratamento. Existem testes de microdureza de Vickers ou Knoop que permitem quantificar a resistência do esmalte a recuperação da microdureza superficial está amplamente correlacionada com o ganho mineral nas lesões iniciais de esmalte (Anil et al., 2022).

Bhavsar et al. (2022) realizaram um estudo *in vitro* em 30 pré-molares distribuídos por três grupos: grupo controle, grupo tratado com CPP-ACPF (Tooth Mousse Plus) e grupo tratado com Bioenamel Gel. Para induzir a desmineralização, as amostras foram submetidas à aplicação de ácido ortofosfórico a 37%, sendo posteriormente lavadas, secas e armazenadas em saliva artificial. A microdureza superficial do esmalte foi avaliada em três momentos: antes da desmineralização, após a desmineralização e após a aplicação dos agentes remineralizantes. Os resultados demonstraram uma diminuição significativa da microdureza após a desmineralização em todos os grupos. Após o tratamento remineralizante, verificou-se um aumento significativo da microdureza superficial, sendo os melhores resultados observados no grupo tratado com Tooth Mousse Plus. Os autores concluíram que ambos os materiais apresentavam potencial remineralizante, embora o CPP-ACPF tenha demonstrado uma recuperação ligeiramente superior das propriedades mecânicas do esmalte desmineralizado (Bhavsar et al., 2022).

No entanto, a microdureza superficial não permite avaliar totalmente a remineralização, sendo necessária a utilização de outras técnicas complementares, como a microdureza transversal (Bhavsar et al., 2022)

Tabela 4: Comparação da microdureza superficial do esmalte antes da desmineralização, após desmineralização e após remineralização com diferentes agentes remineralizantes. (Bhavsar et al., 2022) Adaptado de: Comparative assessment of enamel remineralisation on the surface microhardness of demineralized enamel – an in vitro study (2022).

Grupo	Microdureza inicial (VHN)	Após desmineralização	Após remineralização	Ganho de microdureza	Significância estatística
Controlo	72,91 ± 6,73				Não significativo
Tooth Mousse Plus (CPP-ACP + flúor)	70,52 ± 7,30	61,69 ± 8,61	70,03 ± 7,31	+8,34	p = 0,023
Bioenamel remineralising gel	68,91 ± 9,03	61,00 ± 10,82	66,87 ± 9,23	+5,87	p = 0,01

3.2.2 Microdureza transversal:

A microdureza transversal permite avaliar a distribuição do ganho mineral a diferentes profundidades da lesão cáriosa, fornecendo uma informação mais completa do que a microdureza superficial isolada. Estudos demonstram que a remineralização transversal é geralmente mais acentuada na camada superficial do esmalte do que nas camadas mais profundas, uma vez que a difusão dos iões cálcio, fosfato e fluoreto depende da porosidade do esmalte e da biodisponibilidade iónica (Larnani et al., 2025).

Assim, esta técnica permite obter um perfil de remineralização em profundidade e avaliar a capacidade dos materiais em restaurar as propriedades mecânicas do esmalte.

3.2.3 Microrradiografia transversal:

Uma avaliação precisa da remineralização ex vivo é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes. O método considerado “gold standard” é a microrradiografia transversal (TMR), que utiliza raios X para quantificar o ganho mineral volumétrico no esmalte, expresso em percentagem de remineralização. Permite igualmente avaliar parâmetros como a profundidade da lesão e a perda mineral integrada, facilitando a comparação entre diferentes agentes remineralizantes em estudos experimentais (Fernando et al., 2022).

3.2.4 Microtomografia por raios X:

A microtomografia por raios X é uma técnica de imagem tridimensional não destrutiva que permite analisar a estrutura do esmalte e medir variações volumétricas de mineralização após o tratamento. Este método possibilita observar alterações minerais e a reconstrução estrutural da matriz do esmalte após a remineralização (Hamed et al., 2024).

3.2.5 Microscopia eletrônica de varrimento:

A microscopia eletrônica de varrimento (SEM) é amplamente utilizada para analisar as alterações morfológicas da superfície do esmalte após desmineralização ou remineralização. Permite observar a formação de novos depósitos minerais na superfície do esmalte, confirmando a capacidade de certos materiais em promover a reconstrução parcial da estrutura cristalina

As imagens obtidas permitem ainda identificar irregularidades e diferentes morfologias do esmalte, seja saudável, desmineralizado ou remineralizado.

Agentes à base de biovidro e fluoreto contribuem para restaurar parcialmente a morfologia da superfície do esmalte ao promover a deposição de cristais de fosfato e cálcio (Bhavsar et al., 2022).

3.2.6 Quantificação da perda e ganho mineral:

A quantificação do ganho mineral reflete a capacidade de um agente terapêutico em restaurar a estrutura cristalina do esmalte após desmineralização. Estudos baseados em ciclos de pH demonstram que a remineralização está associada a um aumento da microdureza e a uma diminuição da rugosidade superficial. Além disso, estudos experimentais indicam que certos agentes naturais ou soluções, como a saliva artificial ou o leite, podem promover um aumento mensurável da microdureza, confirmando a ocorrência de remineralização (Larnani et al., 2025).

4/ Fatores que influenciam a eficácia das intervenções remineralizantes:

A eficácia de um agente de remineralização não constitui uma propriedade isolada, mas resulta de uma interação complexa entre o modo de aplicação, as características individuais do paciente e o ambiente oral (Enax et al., 2024)

4.1 Frequência, duração e modo de aplicação das terapias:

Estudos recentes demonstram uma relação estreita entre a remineralização, a concentração e a frequência de exposição ao flúor. O flúor influencia diretamente a distribuição mineral e a profundidade da remineralização dos tecidos dentários (Al-Asmar, 2024)

A eficácia preventiva depende da frequência de exposição do esmalte ao flúor. A escovagem com dentífrico fluoretado duas vezes por dia mostra-se mais eficaz do que uma aplicação única, uma vez que assegura uma disponibilidade regular de fluoreto no biofilme dentário e na saliva, favorecendo os processos de remineralização e contribuindo para contrariar os episódios de queda de pH associados à desmineralização (Barmes, 1996). Além disso, existem dentífricos inovadores que combinam flúor com sílica bioativa, permitindo uma libertação prolongada de flúor e promovendo um maior ganho mineral e melhoria da microdureza do esmalte em comparação com dentífricos contendo apenas flúor. (Sousa et al., 2026).

4.2 Características individuais do indivíduo:

A saliva desempenha um papel fundamental na remineralização ao fornecer íons cálcio e fosfato, essenciais para a reconstrução do esmalte. Estes íons formam hidroxiapatite na superfície do esmalte (Enax et al., 2024).

A diminuição do fluxo salivar (hipossalivação), observada em alguns pacientes idosos ou polimedicados, reduz significativamente o potencial remineralizante e aumenta o risco de cárie (Enax et al., 2024). Além disso, os comportamentos individuais representam um fator determinante, sendo amplamente reconhecido que a etiologia da cárie envolve a interação entre placa dentária, fatores do hospedeiro, hábitos alimentares e tempo, influenciando o equilíbrio entre desmineralização e remineralização (Q. Yang et al., 2025).

4.3 Microbiota oral e biofilme dentário:

Na superfície dentária, as bactérias aderem entre si formando rapidamente um biofilme com elevada resistência a agressões mecânicas e antibióticas. Este biofilme constitui um elemento central na eficácia das estratégias remineralizantes, uma vez que a sua composição microbiana influencia diretamente o pH oral e o equilíbrio mineral. As bactérias acidogénicas produzem ácidos orgânicos que dissolvem a hidroxiapatite; quando o pH desce

abaixo do valor crítico, inicia-se a desmineralização (Sari Widyarman et al., 2024).

Na superfície dentária forma-se inicialmente uma película adquirida composta por proteínas e glicoproteínas salivares. As bactérias pioneiras aderem a esta película através de mecanismos específicos de adesão e, posteriormente, outras espécies bacterianas ligam-se às bactérias já presentes através de fenómenos de co-adesão e co-agregação. Com o desenvolvimento do biofilme, ocorre a produção de uma matriz extracelular rica em polissacarídeos, proteínas e ADN extracelular, que confere estabilidade estrutural e proteção à comunidade microbiana (Karygianni et al., 2020)

A estrutura do biofilme desempenha ainda um papel físico importante, limitando a difusão de iões até à superfície do esmalte e reduzindo a eficácia dos agentes remineralizantes (Zhang et al., 2022)

4.4 Interações entre alimentação, flúor e outros iões:

A remineralização depende fortemente da biodisponibilidade e da interação entre diferentes iões presentes no meio oral. O flúor atua em sinergia com o cálcio e o fosfato favorecendo a formação de fluoroapatite que é mais estável e menos solúvel em meio ácido.

Quando este equilíbrio é perturbado devido à acumulação de biofilme, podem desenvolver-se lesões iniciais ou WSL. É extremamente pertinente o facto de querer resolver as WSL o mais rapidamente possível para impedir o aparecimento de cavidades. Além disso a combinação de flúor e nano-hidroxiapatite permite uma remineralização mais profunda e mais homogénea.

A presença de cárie é uma doença diretamente dependente de um consumo elevado de açúcar, os açúcares alimentares atuam como um substrato que agrava os problemas buco-dentários, particularmente quando a eliminação

da placa é ineficaz. O aporte de açúcar vai provocar uma queda do pH, limitando os efeitos dos agentes remineralizantes. E ao contrário o aporte suficiente em cálcio e fosfato pode favorecer o processo de remineralização (Abbinante et al., 2024).

PARTE III / Papel da comunicação e do comportamento na prevenção:

1/ Modelos teóricos de comunicação em saúde e mudança de comportamento:

A prevenção da cárie dentária depende fortemente dos comportamentos dos indivíduos, nomeadamente a higiene oral, a alimentação e a adesão às recomendações terapêuticas. Estudos recentes confirmam que a cárie dentária é uma doença multifatorial na qual os fatores comportamentais desempenham um papel central ao lado dos mecanismos biológicos. Embora a eficácia preventiva do flúor esteja bem estabelecida, o sucesso no mundo real depende da aceitação dos pacientes destas intervenções e da forma como os fatores socioculturais influenciam as perceções e os comportamentos em relação à utilização do flúor (Yeh et al., 2025).

1.1 Modelo das crenças em saúde:

A adoção do comportamento preventivo depende fortemente da perceção do risco e dos benefícios associados à ação preventiva. Um estudo mostra uma hesitação dos pais relativamente à utilização preventiva de flúor nos seus filhos. Trata-se de um estudo de métodos mistos sobre a tomada de decisão relativamente às formas de flúor. Em medicina dentária, observa-se que a relutância face à utilização do flúor está frequentemente ligada a crenças erradas e a uma perceção insuficiente do risco de cárie. No estudo, a hesitação em relação ao flúor tópico aplicado profissionalmente está significativamente associada à hesitação relativamente à utilização de água fluoretada e de dentífrico fluoretado. No entanto, os pais que hesitavam quanto à aplicação de flúor tópico mostravam-se mais confortáveis com o dentífrico fluoretado do que com a água fluoretada para os seus filhos.

Os pacientes tomam as suas decisões preventivas com base em fatores cognitivos, emocionais e sociais (Ko & Chi, 2023).

1.2 Modelo transteórico da mudança:

Um estudo recente baseado num ensaio clínico randomizado avaliou o impacto da entrevista motivacional baseada no modelo transteórico nos comportamentos de higiene oral. O modelo transteórico é um modelo da mudança do comportamento. Os resultados mostram uma melhoria significativa do comportamento de higiene oral, confirmando que a adaptação das intervenções ao estadio de mudança do indivíduo aumenta a eficácia das estratégias preventivas (He et al., 2023).

O modelo transteórico permite identificar com precisão o nível de motivação do indivíduo, adaptar as mensagens de prevenção e melhorar de forma duradoura a adesão aos comportamentos de higiene oral (He et al., 2023).

Os resultados são ainda mais significativos quando o modelo transteórico é combinado com técnicas de comunicação (He et al., 2023)

1.3 Educação para a saúde:

As abordagens modernas em saúde oral baseiam-se no envolvimento ativo do indivíduo no seu tratamento. As intervenções são mais eficazes do que as abordagens passivas para modificar de forma duradoura os comportamentos. O envolvimento do indivíduo na decisão terapêutica melhora a adesão aos tratamentos preventivos e reforça a confiança no profissional (Cruz et al., 2024).

1.4 Fatores socioeconômicos e literacia em saúde:

A literacia em saúde implica a capacidade de encontrar, compreender, avaliar e utilizar corretamente para a parte do indivíduo as informações e os serviços para manter uma boa saúde. A literacia em saúde oral (OHL) é um tipo de literacia em saúde e um determinante crucial da saúde oral. O indivíduo deve ser capaz de obter, processar e compreender as informações essenciais de saúde oral, aceder aos cuidados dentários e tomar decisões relativas aos eles (Altaş et al., 2025).

A investigação mostra que uma baixa OHL está associada a visitas irregulares ao dentista, maior probabilidade de atrasar o tratamento e piores resultados em saúde oral (Altaş et al., 2025).

Uma baixa OHL está, portanto, associada a uma menor compreensão das mensagens de prevenção, influenciando diretamente comportamentos de saúde como a escovagem. A literacia contribui assim para as desigualdades entre populações (Altaş et al., 2025).

2/ Estratégia de comunicação em saúde oral:

Um estudo mostra que a comunicação centrada no indivíduo é um fator determinante da adesão às recomendações preventivas. A investigação demonstra consistentemente que os indivíduos que se sentem ouvidos e ativamente envolvidos na tomada de decisão têm maior probabilidade de aderir às recomendações do dentista. No entanto, dados recentes mostram que a simples transmissão de informação é insuficiente para induzir uma mudança comportamental duradoura. Recomenda-se recorrer a abordagens contemporâneas que privilegiam estratégias interativas, personalizadas e adaptadas aos determinantes psicossociais dos indivíduos (Mathew et al., 2025).

2.1. Comunicação em contexto clínico individual:

A entrevista motivacional (IM) é um estilo de comunicação centrado no indivíduo que visa desenvolver a motivação e o envolvimento do indivíduo para uma variedade de comportamentos relacionados com a saúde. A IM promove uma abordagem colaborativa centrada no indivíduo para melhorar a adesão aos comportamentos de saúde. Esta técnica é um método de referência, permitindo reforçar a motivação intrínseca e valorizando a autonomia do paciente (Aiman et al., 2025).

2.2. Intervenção em meio escolar e comunitário:

As estratégias de comunicação em meio escolar e comunitário desempenham um papel fundamental na prevenção primária da cárie. Permitem alcançar populações amplas e agir precocemente.

As intervenções de saúde oral por líderes pares em meio escolar, nomeadamente aquelas que envolvem crianças com atividades ou demonstrações, melhoram significativamente os comportamentos de higiene oral, os conhecimentos e alguns indicadores clínicos quando comparadas com a autoaprendizagem através de livros ou artigos científicos (Elsadek et al., 2023).

As intervenções comunitárias, como campanhas de saúde pública, contribuem para sensibilizar a população em geral. No entanto, a sua eficácia depende da capacidade de considerar os determinantes sociais e culturais da sociedade. Existem limitações relacionadas com fatores sociais, económicos, nível de literacia e acessibilidade aos cuidados da população-alvo (Watt et al., 2019).

2.3. Utilização de suportes digitais e tecnologias digitais:

Ter um conhecimento adequado de saúde oral e autoeficácia é essencial para adotar práticas saudáveis e mudar comportamentos de forma duradoura. Os pacientes ortodônticos enfrentam desafios únicos para manter uma higiene oral adequada devido à complexidade dos aparelhos ortodônticos (Balbaa et al., 2025).

As intervenções digitais estão a ganhar cada vez mais importância à medida que o acesso à internet e aos smartphones se expande. Uma vez que indivíduos com baixa OHL tendem a envolver-se menos em métodos tradicionais de educação em saúde oral, a integração de novas tecnologias, como lembretes via WhatsApp, pode oferecer uma oportunidade mais envolvente e aumentar os conhecimentos e comportamentos de saúde oral (Balbaa et al., 2025).

Um programa digital OralHealth através de aplicação móvel foi implementado num estudo com pacientes ortodônticos entre 15 e 25 anos. Este programa consistiu no envio de 46 mensagens via WhatsApp ao longo de 12 semanas; antes e depois do estudo foram medidos o índice de placa (IP) e a OHL (Balbaa et al., 2025).

Um programa digital baseado no programa mOralHealth da Organização Mundial da Saúde foi implementado num estudo randomizado envolvendo pacientes ortodônticos entre os 16 e os 25 anos. A intervenção consistiu no envio de 46 mensagens educativas e motivacionais através do WhatsApp ao longo de 12 semanas, complementando as instruções de higiene oral habitualmente fornecidas pelos ortodontistas. Antes do início do estudo e após um e três meses de acompanhamento, foram avaliados o índice de placa (IP) e a literacia em saúde oral (OHL) (Balbaa et al., 2025).

Os resultados demonstraram que, após três meses, os participantes que receberam as mensagens apresentavam um índice de placa significativamente inferior ao do grupo controlo (1,33 versus 1,83; $p = 0,001$), indicando uma

melhoria da higiene oral. Verificou-se igualmente um aumento significativo dos níveis de literacia em saúde oral, particularmente nos domínios da leitura e das competências numéricas. Além disso, os autores observaram que níveis mais elevados de OHL estavam associados a uma menor acumulação de placa bacteriana. Estes resultados sugerem que intervenções digitais simples, implementadas através de aplicações amplamente utilizadas como o WhatsApp, podem reforçar a adesão às recomendações de higiene oral e favorecer mudanças comportamentais sustentadas em pacientes ortodônticos (Balbaa et al., 2025).

2.4. Comunicação adaptada e personalização das mensagens:

As abordagens contemporâneas em comunicação em saúde oral enfatizam a necessidade de personalizar as mensagens de acordo com as características individuais da população-alvo. As intervenções devem ser adaptadas ao nível de literacia dos participantes, uma vez que esta adaptação permite melhorar significativamente a literacia em saúde oral (OHL), a compreensão das mensagens preventivas e a capacidade dos indivíduos para tomar decisões informadas sobre a sua saúde oral (Hosseini et al., 2025).

Num estudo realizado por Hosseini et al. (2025), os métodos educativos foram adaptados ao nível de literacia dos estudantes e incluíram palestras, sessões de perguntas e respostas, demonstrações práticas com modelos, vídeos educativos e distribuição de folhetos informativos. Os resultados demonstraram uma melhoria significativa da OHL e dos conhecimentos relacionados com a saúde oral após a intervenção, evidenciando a importância da adaptação das estratégias de comunicação às características dos destinatários (Hosseini et al., 2025).

Outros estudos demonstraram que as abordagens educativas adaptadas não só melhoram a literacia em saúde oral, mas também produzem benefícios clínicos mensuráveis. Shirahmadi et al. (2024) observaram uma redução

significativa do índice de placa bacteriana, um aumento da frequência de escovagem dentária e uma utilização mais regular do fio dentário entre os participantes que receberam intervenções educativas adaptadas (Shirahmadi et al., 2024).

Entre os idosos, a saúde oral constitui um importante problema de saúde pública, frequentemente associado a uma elevada prevalência de cárie radicular, doença periodontal, perda dentária e dificuldades na manutenção da higiene oral. Uma revisão sistemática realizada por Bashirian et al. (2023), que analisou estudos de intervenção dirigidos a idosos e aos seus cuidadores, demonstrou que as estratégias educativas adaptadas às capacidades cognitivas desta população melhoram significativamente os conhecimentos em saúde oral, a literacia em saúde oral, a autoeficácia e os comportamentos de higiene oral. Além disso, vários estudos incluídos na revisão relataram melhorias em indicadores clínicos, nomeadamente reduções dos índices de placa bacteriana e de inflamação gengival, bem como uma melhor higiene das próteses dentárias. Estes resultados reforçam a importância da utilização de explicações simplificadas, materiais educativos adequados e suportes visuais para aumentar a eficácia das intervenções preventivas dirigidas à população idosa (Bashirian et al., 2023).

3/ Barreiras e facilitadores da implementação das estratégias:

A implementação das estratégias preventivas em saúde oral depende em grande parte da qualidade da comunicação entre o profissional e o paciente. Dados recentes mostram que a comunicação desempenha um papel central na adesão dos pacientes às recomendações do profissional e aos resultados clínicos (Pilgrim et al., 2024).

3.1 Barreiras individuais:

3.1.a Falta de conhecimentos e baixa literacia em saúde:

A literacia em saúde oral constitui um determinante importante dos comportamentos preventivos; um baixo nível de literacia está associado a menor adesão às práticas preventivas e a um risco aumentado de patologia oral (Altaş et al., 2025).

3.1.b Crenças erradas, medo do tratamento e comportamentos de risco:

Uma comunicação eficaz conduzida pelo dentista é fundamental para promover a relação paciente-dentista. A personalização é essencial na implementação de estratégias de comunicação, consistindo na adaptação às crenças, preocupações e experiências do paciente (Cruz et al., 2024).

Um estudo qualitativo centrado nas experiências de dentistas na gestão de pacientes hesitantes em relação à aplicação de flúor mostra que crenças erradas e fatores emocionais constituem barreiras à adesão ao tratamento e às recomendações. Estas resistências requerem abordagens de comunicação adaptadas para serem ultrapassadas (Cruz et al., 2024).

3.1.c Custos e acessibilidade aos cuidados:

Ao contrário da cobertura universal dos cuidados de saúde gerais financiados por fundos públicos no Canadá, os cuidados dentários são uma responsabilidade individual para a maioria da população canadiana. No artigo referido (Abdelrehim & Singhal, 2024), a maioria da população não possui seguro dentário e financia os cuidados dentários de forma privada. Como uma grande proporção dos canadenses financia os seus próprios cuidados dentários, o custo torna-se o principal fator limitador do acesso. O seguro de saúde reduz as barreiras financeiras, mas não as elimina totalmente, funcionando como

intermediário de benefícios e reembolsando os pacientes conforme o nível de cobertura (Abdelrehim & Singhal, 2024).

Os custos diretos constituem assim uma barreira importante ao acesso aos cuidados dentários nas populações desfavorecidas; indivíduos com rendimentos mais baixos recorrem menos aos cuidados dentários. Mesmo com cobertura de seguro, o acesso universal continua limitado, contribuindo para desigualdades em saúde oral e maior prevalência de doenças de cárie (Abdelrehim & Singhal, 2024).

3.2 Barreiras estruturais:

3.2.a Limitações organizacionais na prática clínica:

As restrições enfrentadas pelos médicos dentistas, como falta de tempo de consulta, elevada carga de trabalho e recursos limitados, constituem obstáculos à integração de estratégias preventivas e de comunicação na prática clínica contínua (Rogers et al., 2022).

3.2.b Políticas de saúde e reorganização dos sistemas de cuidados:

As políticas de saúde e a organização dos sistemas de cuidados influenciam fortemente a implementação de estratégias preventivas em saúde oral. Atualmente, os sistemas de saúde estão mais orientados para o tratamento e menos para a prevenção. A prevenção ainda ocupa um lugar limitado, o que se explica pelo facto de os modelos de financiamento valorizarem mais os tratamentos do que as ações preventivas. Existe também um desfasamento entre o conhecimento científico e a sua aplicação nas políticas de saúde. Assim, recomenda-se uma reorientação dos sistemas de cuidados para abordagens mais centradas na prevenção, de forma a melhorar a saúde oral da população e reduzir desigualdades (Listl et al., 2023).

3.3 Facilitadores da implementação:

3.3.a Políticas públicas favoráveis à prevenção:

As políticas públicas desempenham um papel importante na promoção da saúde oral. A integração da prevenção nos sistemas de saúde contribui significativamente para melhorar a saúde oral da população e reduzir desigualdades pelo que é essencial uma reorientação para políticas baseadas na prevenção para otimizar resultados (Listl et al., 2023).

3.3.b Programas escolares de saúde oral e fluoretação da água:

Os programas de saúde oral em meio escolar constituem um fator-chave na melhoria das estratégias preventivas. As escolas são frequentemente consideradas um ponto de entrada para intervenções gerais e de saúde oral. Os comportamentos de saúde são estabelecidos desde cedo, tornando a escola um ambiente ideal para influenciar e desenvolver o bem-estar da criança.

As intervenções conduzidas por estudantes para promoção da saúde oral são cada vez mais comuns. Os estudantes são considerados “pares” das crianças, e a utilização de pares baseia-se num modelo de influência social. Uma criança pode aumentar a sua autoeficácia ao adquirir novos conhecimentos e competências. As intervenções realizadas por estudantes são consideradas influências mais fortes do que aquelas exercidas por profissionais ou professores (Elsadek et al., 2023).

A fluoretação da água constitui igualmente uma estratégia de saúde pública destinada à prevenção da cárie dentária. Consiste no ajuste controlado da concentração de fluoreto na água de abastecimento, de modo a favorecer a remineralização do esmalte e a reduzir a sua desmineralização. Esta medida permite alcançar uma grande parte da população, independentemente da idade, do nível socioeconómico ou do acesso regular a cuidados médico-dentários. No entanto, a sua implementação deve ser acompanhada por uma monitorização rigorosa da concentração de fluoreto, de forma a garantir a sua eficácia e a

prevenir uma exposição excessiva, particularmente durante o desenvolvimento dentário (Iheozor-Ejiofor et al., 2024).

4/ Avaliação do impacto das intervenções de comunicação em saúde oral:

A avaliação das intervenções de comunicação em saúde oral é essencial para medir a eficácia das estratégias preventivas. É importante considerar as dimensões comportamentais, psicológicas e clínicas dos pacientes. Diferentes estudos integram parâmetros diversos para obter uma visão global. De acordo com um estudo recente que avaliou a eficácia de três intervenções escolares para melhorar os comportamentos de saúde oral, as entrevistas motivacionais na escola mostraram-se mais eficazes do que a educação tradicional (Ko & Chi, 2023).

4.1 Medição de conhecimentos, atitudes e comportamentos:

Um dos primeiros indicadores de eficácia das intervenções preventivas baseia-se na evolução dos conhecimentos, atitudes e comportamentos do indivíduo. Os programas educativos geralmente mostram uma melhoria destes parâmetros. Um programa baseado no Modelo das Crenças em Saúde (Health Belief Model – HBM) demonstrou ser mais eficaz do que os métodos educativos convencionais na promoção da saúde oral. Os resultados mostraram melhorias significativas nas práticas de higiene oral e nas diferentes dimensões do modelo. A alteração mais importante foi observada na suscetibilidade percebida, ou seja, na percepção dos participantes relativamente ao seu próprio risco de desenvolver cárie dentária ou outros problemas de saúde oral. Em contrapartida, as menores alterações foram observadas na gravidade percebida da doença e nos benefícios percebidos das medidas preventivas (Sanaeinasab et al., 2022).

No entanto, dados recentes mostram que o aumento do conhecimento após intervenções preventivas nem sempre é suficiente para promover mudanças duradouras no comportamento. Assim, abordagens mais interativas, como a entrevista motivacional, podem favorecer a adesão a longo prazo às

recomendações preventivas. Estas estratégias centram-se no indivíduo e procuram promover mudanças comportamentais sustentáveis (Arnett et al., 2022).

4.2 Correlação com indicadores clínicos e biológicos:

A avaliação das intervenções deve também incluir indicadores clínicos e biológicos como o índice CAO (dentes Cariados, Ausentes e Obturados), índice padrão da OMS para avaliar a saúde oral, o IP ou sinais inflamatórios gengivais. Estes parâmetros permitem medir o impacto real das intervenções na saúde oral, reforçando a importância de uma abordagem que combine comunicação e intervenção clínica (Sanaeinasab et al., 2022).

4.3 Métodos de recolha de dados:

Podem ser utilizados vários métodos para avaliar o impacto das intervenções em saúde oral. Questionários estruturados permitem medir conhecimentos, atitudes e comportamentos dos pacientes. Num estudo transversal realizado com estudantes de medicina dentária, as competências de comunicação foram avaliadas através de três perspetivas complementares: a observação direta por um investigador, a avaliação pelos próprios pacientes e a autoavaliação dos estudantes. Esta abordagem permitiu obter uma visão mais abrangente do desempenho comunicacional dos estudantes ao longo das diferentes etapas da entrevista clínica e evidenciou diferenças significativas entre as avaliações realizadas pelos diferentes intervenientes (Memarpour et al., 2016).

Os estudos também utilizam questionários pré e pós-intervenção para avaliar a evolução dos comportamentos e perceções. Um estudo mostra que a gamificação e a aprendizagem em fase pré-clínica ajudam a compreender a interação dentista-indivíduo e aumentam a motivação e autoeficácia dos estudantes (Lin & Yang, 2023).

Em complemento, exames clínicos e follow-up permitem avaliar os efeitos das intervenções a longo prazo.

4.4 Limitações e desafios da avaliação:

A avaliação das intervenções de comunicação apresenta limitações, nomeadamente a grande heterogeneidade de métodos e indicadores utilizados, o que dificulta a comparação de resultados. Além disso, a existência de múltiplas variáveis pode dificultar a interpretação da eficácia das intervenções. Os efeitos a muito longo prazo das mudanças comportamentais ainda estão pouco documentados, o que evidencia a necessidade de estudos longitudinais e de uma padronização dos métodos de avaliação (Goldberg et al., 2022).

PARTE IV/ Síntese, recomendações e perspectivas:

1/ Recomendação prática:

1.1 Para os profissionais de saúde oral:

Os profissionais de saúde oral desempenham um papel fundamental na prevenção da cárie dentária. Recomenda-se uma abordagem global e personalizada, integrando dados científicos, mas também as características individuais dos pacientes.

A escolha dos agentes de remineralização deve ser adaptada ao nível de risco de cárie, privilegiando os produtos fluoretados como primeira linha, eventualmente associados a outros agentes em situações específicas. A frequência e os modos de aplicação devem ser claramente explicados para otimizar a sua eficácia.

Além disso, a comunicação com o indivíduo deve ser clara, adaptada e centrada nas suas necessidades. A utilização da entrevista motivacional permite melhorar a adesão às recomendações e promover mudanças comportamentais duradouras.

É igualmente importante ter em conta o nível de literacia do paciente e utilizar suportes visuais ou digitais sempre que possível. Deve também ser prevista uma abordagem preventiva sistemática na prática clínica, dando espaço à educação do paciente e a um acompanhamento regular.

1.2 Para as políticas públicas e programas de saúde:

A nível populacional, a prevenção da cárie dentária exige a implementação de políticas de saúde pública eficazes e equitativas. Recomenda-se o reforço da educação desde a infância através de programas escolares estruturados.

É importante promover a melhoria do acesso a produtos e cuidados preventivos. Isto inclui a promoção da fluoretação da água e a redução das barreiras económicas no acesso aos cuidados dentários.

As políticas devem evoluir no sentido de uma maior orientação para a prevenção, valorizando os atos preventivos e integrando a saúde oral nas estratégias globais.

III.CONCLUSÃO

Todos os dados analisados nesta tese sublinham o carácter dinâmico do processo de desmineralização e remineralização do esmalte dentário. Estes fenómenos baseiam-se num equilíbrio entre fatores bioquímicos, como a disponibilidade de iões cálcio, fosfato e flúor, e fatores ambientais e comportamentais, que incluem a alimentação e a higiene oral. Os avanços recentes e numerosos estudos permitiram uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos nestes processos, nomeadamente o papel da saliva e do microambiente oral. Paralelamente, o desenvolvimento de agentes remineralizantes, como o flúor tradicional ou inovações como a nano-hidroxiapatite e biomateriais biomiméticos, oferece perspectivas promissoras para reduzir a ocorrência de cárie dentária.

A eficácia destas estratégias depende também em grande parte da sua correta utilização pelos pacientes. Os estudos destacam igualmente que a comunicação em saúde e os comportamentos individuais desempenham um papel fundamental no sucesso das intervenções preventivas. As perspectivas de investigação na prevenção da cárie dentária são numerosas e promissoras. No plano biológico, destaca-se o desenvolvimento de novos materiais biomiméticos e estratégias inovadoras.

No plano tecnológico, as ferramentas digitais, como aplicações móveis e plataformas de comunicação digital, oferecem novas oportunidades para melhorar a educação dos pacientes, o acompanhamento e a adesão aos tratamentos.

No entanto, estas inovações deverão ser acompanhadas de uma avaliação rigorosa da sua eficácia a longo prazo e da sua acessibilidade à população.

Por fim, uma abordagem multidisciplinar que integre as dimensões biológicas, comportamentais e sociais parece essencial para responder aos desafios atuais em saúde oral. A colaboração entre profissionais de saúde e

investigadores será determinante para desenvolver estratégias de prevenção eficazes, sustentáveis e equitativas.

IV.BIBLIOGRAFIA

Abbinante, A., Antonacci, A., Antonioni, M., Butera, A., Castaldi, M., Cotellessa, S., Di Marco, C., Gangale, M., Izzetti, R., Luperini, M., Maiorani, C., Nardi, G. M., Ravoni, A., Sabatini, S., Sestito, S., Virno, A., & Graziani, F. (2024). Concordance and Clinical Outcomes Improvement Following Oral Hygiene Motivation: A Systematic Review and Report of the Workshop of the Italian Societies of Dental Hygiene. In *International Journal of Dentistry* (Vol. 2024). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1155/2024/8592336>

Abdelrehim, M., & Singhal, S. (2024). Is private insurance enough to address barriers to accessing dental care? Findings from a Canadian population-based study. *BMC Oral Health*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04271-0>

Afonso, M., Buzalaf, R., Reis Hannas, A., & Kato, M. T. (n.d.). Saliva and dental erosion. In *J Appl Oral Sci* (Vol. 493). Retrieved www.scielo.br/jaos

Aiman, H., Kilgariff, J. K., Marks, D., & Albiston, M. (2025). Does motivational interviewing have a role in dentistry? *British Dental Journal*, 238(3), 166–171. <https://doi.org/10.1038/s41415-025-8319-x>

Al-Asmar, A. A. (2024). Mineralization of Dentinal Lesions with Different Concentrations of Fluoride. *International Journal of Dentistry*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/3476050>

Almajed, O. S., Aljouie, A. A., Alharbi, M. S., & Alsulaimi, L. M. (2024). The Impact of Socioeconomic Factors on Pediatric Oral Health: A Review. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.53567>

Altaş, Z. M., Sezerol, M. A., Halaç, Ş., & Aslan, M. N. (2025). The relationship between oral and dental health literacy and health-seeking behaviors: a multicenter community-based study. *BMC Public Health*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-025-24904-5>

Anil, A., Ibraheem, W. I., Meshni, A. A., Preethanath, R. S., & Anil, S. (2022). Nano-Hydroxyapatite (nHAp) in the Remineralization of Early Dental Caries: A Scoping Review. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Number 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095629>

Arnett, M. C., Rogers, K. M., Evans, M. D., & Reibel, Y. (2022). Effectiveness of brief motivational interviewing on perceived importance, interest and self-efficacy of oral health behaviors: A randomized clinical trial. *PEC Innovation*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.pecinn.2022.100092>

- Balbua, N. M., Hamza, M. A., Abdelaziz, W. E., & Adham, M. M. (2025). Effectiveness of mobile oral health intervention on orthodontic patients' oral hygiene and oral health literacy: a randomised controlled clinical trial. *BMC Oral Health*, 26(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-025-07423-y>
- Barmes, D. E. (1996). Fluorides and oral health. *Community Dental Health*, 13 SUPPL. 2, 3–4. <https://doi.org/10.11603/ijmmr.2413-6077.2022.2.13121>
- Bashirian, S., Khoshraves, S., Ayubi, E., Karimi-Shahanjarini, A., Shirahmadi, S., & Solaymani, P. F. (2023). The impact of health education interventions on oral health promotion among older people: a systematic review. *BMC Geriatrics*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12877-023-04259-5>
- Bhavsar, B., Vijo, M., Sharma, P., Patnaik, T., Alam, M. K., & Patil, S. (2022). Comparative assessment of enamel remineralisation on the surface microhardness of demineralized enamel - an in vitro study. *PeerJ*, 10. <https://doi.org/10.7717/peerj.14098>
- Bowen, W. H. (2013). The Stephan Curve revisited. *Odontology*, 101(1), 2–8. <https://doi.org/10.1007/s10266-012-0092-z>
- Cruz, S., Ko, A., & Chi, D. L. (2024). A Qualitative Study on Dentists' Communication Approaches in Managing Fluoride-Hesitant Caregivers. *JDR Clinical and Translational Research*, 9(3), 212–220. <https://doi.org/10.1177/23800844231203673>
- Dobrzyński, M., Kotela, A., Klimas, S., Majchrzak, Z., Kensy, J., Laszczyńska, M., Michalak, M., Rybak, Z., Fast, M., & Matys, J. (2025). Evaluation of Factors Affecting Fluoride Release from Fluoride Varnishes: A Systematic Review. In *Materials* (Vol. 18, Number 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ma18194603>
- Dorozhkin, S. V. (2009). Calcium orthophosphates in nature, biology and medicine. In *Materials* (Vol. 2, Number 2, pp. 399–498). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma2020399>
- Elsadek, Y. E., Edwebi, S., Turner, A., Vinall-Collier, K., Csikar, J., & Pavitt, S. (2023). A systematic review of school-based student peer-led oral health interventions to promote the oral health of school children. *BMC Oral Health*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03482-1>
- Enax, J., Fandrich, P., Schulze zur Wiesche, E., & Eppe, M. (2024). The Remineralization of Enamel from Saliva: A Chemical Perspective. In *Dentistry Journal* (Vol. 12, Number 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/dj12110339>

- Farooq, I., & Bugshan, A. (2020). The role of salivary contents and modern technologies in the remineralization of dental enamel: A review. *F1000Research*, 9. <https://doi.org/10.12688/f1000research.22499.1>
- Fernando, J. R., Shen, P., Yuan, Y., Adams, G. G., Reynolds, C., & Reynolds, E. C. (2024). Remineralisation of enamel and dentine with stabilised stannous fluoride dentifrices in a randomised cross-over in situ trial. *Journal of Dentistry*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104895>
- Fernando, J. R., Walker, G. D., Park, T. K. S., Shen, P., Yuan, Y., Reynolds, C., & Reynolds, E. C. (2022). Comparison of calcium-based technologies to remineralise enamel subsurface lesions using microradiography and microhardness. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13905-8>
- Garrido-Martínez, P., Domínguez-Gordillo, A., Cerero-Lapiedra, R., Bur-Gueño-García, M., Martínez-Ramírez, M. J., Gómez-Candela, C., Cebrián-Carretero, J. L., & Esparza-Gómez, G. (2019). Oral and dental health status in patients with eating disorders in Madrid, Spain. *Medicina Oral Patología Oral y Cirugía Bucal*, 24(5), e595–e602. <https://doi.org/10.4317/medoral.23010>
- Goldberg, E., Eberhard, J., Bauman, A., & Smith, B. J. (2022). Mass media campaigns for the promotion of oral health: a scoping review. *BMC Oral Health*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02212-3>
- Gonçalves, F. M. C., Quinteiro, J. P., Hannig, C., de Almeida, E. M. F. C., Delbem, A. C. B., Cannon, M. L., & M, M. D. (2025). In situ remineralization of enamel caries lesions with a toothpaste supplemented with fluoride, amorphous calcium phosphate casein phosphopeptide and trimetaphosphate. *Journal of Dentistry*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105618>
- Hamdi, K., Hamama, H. H., Motawea, A., Fawzy, A., & Mahmoud, S. H. (2022). Long-term evaluation of early-enamel lesions treated with novel experimental tricalcium silicate paste: A 2-year randomized clinical trial. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 34(7), 1113–1121. <https://doi.org/10.1111/jerd.12941>
- He, G., Wang, Z., Hu, C., Yang, Y., Wang, N., Shao, L., & You, J. (2023). The effect of motivational interviewing based on the transtheoretical model on oral cleaning behavior of patients with periodontitis who have undergone implant restoration. *Technology and Health Care : Official Journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 31(S1), 541–549. <https://doi.org/10.3233/THC-236048>

- Hosseini, M. S., Rakhshanderou, S., Safari-Moradabadi, A., Ghaffari, M., & Pakkhesal, M. (2025). Effectiveness of a school-based oral health literacy promotion intervention: a randomized controlled trial (RCT) among adolescents. *BMC Public Health*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-025-23124-1>
- Jameel, R. A., Zaidi, S. J. A., Siddiqui, S., Rehman, A., Gul, J., Saquib, M., & Rahim, Z. A. (2024). The effects of beverage erosion on enamel: evaluating surface characteristics and loss of calcium and phosphate ions. *Discover Applied Sciences*, 6(8). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06153-0>
- Karygianni, L., Ren, Z., Koo, H., & Thurnheer, T. (2020). Biofilm Matrixome: Extracellular Components in Structured Microbial Communities. In *Trends in Microbiology* (Vol. 28, Number 8, pp. 668–681). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.03.016>
- Ko, A., & Chi, D. L. (2023). Fluoride hesitancy: A mixed methods study on decision-making about forms of fluoride. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, 51(5), 997–1008. <https://doi.org/10.1111/cdoe.12800>
- Koo, H., Falsetta, M. L., & Klein, M. I. (2013). The Exopolysaccharide Matrix: A Virulence Determinant of Cariogenic Biofilm. *Journal of Dental Research*, 92(12), 1065–1073. <https://doi.org/10.1177/0022034513504218>
- Kornsombut, N., Takenaka, S., Sotozono, M., Nagata, R., Ida, T., Manuschai, J., Saito, R., Takahashi, R., & Noiri, Y. (2024). Antibiofilm Properties and Demineralization Suppression in Early Enamel Lesions Using Dental Coating Materials. *Antibiotics*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/antibiotics13010106>
- Larnani, S., Song, Y., Kim, S., & Park, Y. S. (2025). Examining enamel-surface demineralization upon exposure to acidic solutions and the remineralization potential of milk and artificial saliva. *Odontology*, 113(1), 201–212. <https://doi.org/10.1007/s10266-024-00960-y>
- Li, Z., Yu, C., & Chen, H. (2025). Global, regional, and national caries of permanent teeth incidence, prevalence, and disability-adjusted life years, 1990-2021: analysis for the global burden of disease study. *BMC Oral Health*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06086-z>
- Listl, S., Baltussen, R., Carrasco-Labra, A., Carrer, F. C., & Lavis, J. N. (2023). Evidence-Informed Oral Health Policy Making: Opportunities and Challenges. In *Journal of Dental Research* (Vol. 102, Number 12, pp. 1293–1302). SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/00220345231187828>

- Liu, Y. L., Nascimento, M., & Burne, R. A. (2012). Progress toward understanding the contribution of alkali generation in dental biofilms to inhibition of dental caries. In *International Journal of Oral Science* (Vol. 4, Number 3, pp. 135–140). <https://doi.org/10.1038/ijos.2012.54>
- Lussi, A., & Jaeggi, T. (2008). Erosion - Diagnosis and risk factors. *Clinical Oral Investigations*, 12(SUPPL.1), 5–13. <https://doi.org/10.1007/s00784-007-0179-z>
- Malcangi, G., Patano, A., Morolla, R., De Santis, M., Piras, F., Settanni, V., Mancini, A., Di Venere, D., Inchingolo, F., Inchingolo, A. D., Dipalma, G., & Inchingolo, A. M. (2023). Analysis of Dental Enamel Remineralization: A Systematic Review of Technique Comparisons. In *Bioengineering* (Vol. 10, Number 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10040472>
- Marcenes, W., Kassebaum, N. J., Bernabé, E., Flaxman, A., Naghavi, M., Lopez, A., & Murray, C. J. L. (2013). Global burden of oral conditions in 1990-2010: A systematic analysis. *Journal of Dental Research*, 92(7), 592–597. <https://doi.org/10.1177/0022034513490168>
- Marinho, V. C. C., Chong, L. Y., Worthington, H. V., & Walsh, T. (2016). Fluoride mouthrinses for preventing dental caries in children and adolescents. In *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Vol. 2016, Number 7). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD002284.pub2>
- Marinho, V. C. C., Worthington, H. V., Walsh, T., & Clarkson, J. E. (2013). Fluoride varnishes for preventing dental caries in children and adolescents. In *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Vol. 2013, Number 7). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD002279.pub2>
- Mathew, M. G., Sharma, R., & Anand, A. (2025). Talk smart, treat better: Patient communication. In *British Dental Journal* (Vol. 238, Number 8, p. 607). Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s41415-025-8670-y>
- Memarpour, M., Bazrafkan, L., & Zarei, Z. (2016). Assessment of dental students' communication skills with patients. In *J Adv Med Educ Prof* (Vol. 4, Number 1).
- Pan, Y., Ma, Y., Gui, Z., Jin, Y., Pan, J., Yang, C., & Huang, J. (2025). Dental caries, gingivitis and oral health-related quality of life in 12-year-old children. *BMC Oral Health*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06145-5>

- Pandya, M., & Diekwisch, T. G. H. (2021). Amelogenesis: Transformation of a protein-mineral matrix into tooth enamel. *Journal of Structural Biology*, 213(4). <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2021.107809>
- Pilgrim, C., Catunda, R., Major, P., Perez-Garcia, A., & Flores-Mir, C. (2024). Patient-provider communication during consultations for elective dental procedures: A scoping review. In *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* (Vol. 166, Number 5, pp. 413-422.e6). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2024.07.014>
- Ray, R. R. (2022). Dental biofilm: Risks, diagnostics and management. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102381>
- Rogers, K. M., Arnett, M. C., Mays, K. A., Wang, Q., & Blue, C. M. (2022). Dental hygienists' use of motivational interviewing and perceptions of effectiveness in changing patient behaviors. *Journal of Dental Education*, 86(8), 909–917. <https://doi.org/10.1002/jdd.12919>
- Sanaeinasab, H., Saffari, M., Taghavi, H., Karimi Zarchi, A., Rahmati, F., Al Zaben, F., & Koenig, H. G. (2022). An educational intervention using the health belief model for improvement of oral health behavior in grade-schoolers: a randomized controlled trial. *BMC Oral Health*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02132-2>
- Sari Widyarman, A., Udawatte, N. S., Tegar Badruzzaman, I., Cloudya Panjaitan, C., Apriani, A., Jeddy, Erri Astoeti, T., & Jayampath Seneviratne, C. (2024). Topical fluoride varnish application shifts dysbiotic dental plaque microbiome towards eubiosis in children with dental caries. *Saudi Dental Journal*, 36(10), 1313–1320. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2024.07.010>
- Satou, R., & Sugihara, N. (2024). In Vitro Risk Assessment of Dental Acid Erosion Caused by Long-Term Exposure to Oral Liquid Bandages. *Dentistry Journal*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/dj12030070>
- Shirahmadi, S., Bashirian, S., Soltanian, A. R., Karimi-shahanjarini, A., & Vahdatinia, F. (2024). Effectiveness of theory-based educational interventions of promoting oral health among elementary school students. *BMC Public Health*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-023-17528-0>
- Sousa, E. B. G., Forte, A. G., Cunha, J. L., Paiva, M. A. A., Nunes, V. R. R., Ferreira, A. M., Pereira, A. M. B. C., Sampaio, F. C., & Oliveira, A. F. B. (2026). Innovative dentifrices based on bioactive silica for enamel remineralization and erosion control: an in vitro study. *BMC Oral Health*, 26(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-025-07502-0>

- Spatafora, G., Li, Y., He, X., Cowan, A., & Tanner, A. C. R. (2024). The Evolving Microbiome of Dental Caries. In *Microorganisms* (Vol. 12, Number 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/microorganisms12010121>
- Tang, Z., Shan, S., Chen, Z., & Shao, C. (2023). Progress in the Application of Biomimetic Mineralization for Tooth Repair. In *Minerals* (Vol. 13, Number 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/min13111433>
- Walsh, T., Worthington, H. V., Glenny, A. M., Marinho, V. C. C., & Jeroncic, A. (2019). Fluoride toothpastes of different concentrations for preventing dental caries. In *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Vol. 2019, Number 3). John Wiley and Sons Ltd.
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD007868.pub3>
- Wan Hassan, W. N., Tee, Y. Y., Md Razali, K., Abdul Razak, A. A., Lim, H. H., Zakaria, N., Sukumaran, P., Mohd Tahir, N. N. zahidah, & Chew, H. P. (2025). A 12-months randomized clinical trial comparing fluoride-based remineralising protocols on post-orthodontic initial caries lesions. *Clinical Oral Investigations*, 29(2). <https://doi.org/10.1007/s00784-025-06172-0>
- Watt, R. G., Daly, B., Allison, P., Macpherson, L. M. D., Venturelli, R., Listl, S., Weyant, R. J., Mathur, M. R., Guarnizo-Herreño, C. C., Celeste, R. K., Peres, M. A., Kearns, C., & Benzian, H. (2019). Ending the neglect of global oral health: time for radical action. In *The Lancet* (Vol. 394, Number 10194, pp. 261–272). Lancet Publishing Group.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)31133-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)31133-X)
- WHO_TRS_494_fre. (n.d.).
- Yang, Q., Li, F., Ye, Y., & Zhang, X. (2025). Antimicrobial, remineralization, and infiltration: advanced strategies for interrupting dental caries. In *Medical Review* (Vol. 5, Number 2, pp. 87–116). Walter de Gruyter GmbH.
<https://doi.org/10.1515/mr-2024-0035>
- Yeh, C.-H., Wang, Y.-L., Thuy, T., Vo, T., Lee, Y.-C., & Lee, I.-T. (2025). *Fluoride in Dental Caries Prevention and Treatment: Mechanisms, Clinical Evidence, and Public Health Perspectives*. 13, 2246.
<https://doi.org/10.3390/healthcare>
- Zhang, Q., Guan, L., Guo, J., Chuan, A., Tong, J., Ban, J., Tian, T., Jiang, W., & Wang, S. (2022). Application of fluoride disturbs plaque microecology and promotes remineralization of enamel initial caries. *Journal of Oral Microbiology*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/20002297.2022.2105022>