



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Luiza Altamirano

**Avaliação longitudinal tridimensional do desgaste dental ácido-abrasivo e da
perda mineral: um estudo exploratório in vitro**

Araraquara

2026



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Luiza Altamirano

Avaliação longitudinal tridimensional do desgaste dental ácido-abrasivo e da perda mineral: um estudo exploratório in vitro

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Odontologia, Araraquara para obtenção do título de Mestre em Ciências Odontológicas, na Área de Dentística Restauradora

Orientador: Prof. Dr. Osmir Batista de Oliveira Jr.

Araraquara

2026

A465a Altamirano, Luiza
Avaliação longitudinal tridimensional do desgaste dental
ácido-abrasivo e da perda mineral: um estudo exploratório in
vitro / Luiza Altamirano. -- Araraquara, 2026
48 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara
Orientadora: Osmir Batista de Oliveira Junior

1. Erosão dentária. 2. Abrasão dentária. 3. Imagem
tridimensional. I. Título.

Luiza Altamirano

Avaliação longitudinal tridimensional do desgaste dental ácido-abrasivo e da perda mineral: um estudo exploratório in vitro

Comissão julgadora

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Odontológicas

Presidente e orientador Prof. Dr. Osmir Batista de Oliveira Jr.

2º Examinador Profa. Dra. Andrea Abi Rached Dantas.

3º Examinador Prof. Dr. Victor Humberto Orbegoso Flores.

Araraquara, 02 de abril de 2026

DADOS CURRICULARES

Luiza Altamirano

NASCIMENTO: 09/08/1996 - Belém - Pará

FILIAÇÃO: Mônica Altamirano e Ricardo Bemmuyal Altamirano

2019-2022 - Graduação em Odontologia pela Universidade de Marília (Marília-sp)

2025-Atual - Especialização em Ortodontia pela Faculdade Herrero (Curitiba - Paraná)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ricardo e Monica, que sempre me apoiaram e incentivaram ao longo de todo o meu percurso educacional. Mesmo diante da distância, permaneceram sendo o meu porto seguro, dedicando-se incansavelmente para que este sonho pudesse se tornar realidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Osmir Batista de Oliveira Junior, pelos ensinamentos ao longo desta jornada e por me mostrar, na prática, como funciona o caminho da pesquisa no mestrado. Mesmo diante dos percalços que surgiram ao longo do percurso, nunca desistiu e sempre me incentivou a buscar respostas, a pesquisar e a construir o conhecimento de forma ativa, sem esperar que tudo viesse pronto.

Ao Gabriel Ramos Saad, que esteve presente desde o início deste trabalho, participando ativamente do desenvolvimento da pesquisa e compartilhando os desafios e aprendizados ao longo de todo o processo.

Ao amigo Vitório Eduardo de Quina Aguiar, que foi um grande apoio durante este processo, estando sempre disposto a ajudar no andamento da pesquisa.

Ao Tito, pela generosidade em compartilhar seu tempo e conhecimento, ensinando sobre os softwares utilizados, auxiliando na análise dos arquivos e contribuindo significativamente para a construção e interpretação dos resultados apresentados nesta dissertação.

À minha parceira Isadora Ferreira, que esteve ao meu lado em todos os momentos, rindo e chorando comigo. Agradeço pelo apoio constante, por acreditar em mim e no meu potencial profissional mesmo quando eu mesma já não acreditava, e por sempre se dedicar para que este sonho também pudesse se concretizar.

À Faculdade de Odontologia de Araraquara - UNESP e ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia Restauradora, pela estrutura e suporte oferecidos para a realização deste trabalho.

Ao Instituto de Química da UNESP, pela colaboração nas análises realizadas, especialmente à funcionária Sonia, pelo auxílio e apoio durante a realização das análises em microscopia eletrônica de varredura.

À CAPES:

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Altamirano L. Avaliação longitudinal tridimensional do desgaste dental ácido-abrasivo e da perda mineral: um estudo exploratório in vitro [dissertação de mestrado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2026.

RESUMO

O desgaste dental erosivo é uma condição multifatorial caracterizada pela perda progressiva de tecido dental causada por processos químicos e mecânicos. Episódios repetidos de exposição ao ácido gástrico, frequentemente associados à escovação dental imediata, podem acelerar esse processo, sendo observados em pacientes com bulimia nervosa. O objetivo deste estudo foi avaliar longitudinalmente o desgaste dental induzido por desafios ácido-abrasivos e suas possíveis alterações mineralógicas por meio de análise tridimensional utilizando scanner intraoral. Neste estudo experimental in vitro, dentes bovinos foram preparados e montados em arcadas acrílicas, contendo regiões de interesse em esmalte e dentina radicular. As amostras foram submetidas a ciclos diários de desafio ácido com solução simulando ácido gástrico, seguidos de escovação dental padronizada. O desgaste foi monitorado longitudinalmente por meio de escaneamento intraoral tridimensional em diferentes tempos experimentais. Amostras selecionadas foram removidas ao longo do experimento para análise morfológica e determinação da composição mineral por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS). Os resultados mostraram progressão do desgaste dental ao longo dos ciclos experimentais, com aumento gradual da proporção de superfícies apresentando perda estrutural detectável pelo scanner. Tanto o esmalte quanto a dentina radicular apresentaram desgaste, com magnitude média semelhante entre os tecidos, porém com diferenças no padrão de variabilidade e progressão temporal. A análise mineralógica indicou maior estabilidade da razão Ca/P no esmalte e maior variabilidade nos resultados obtidos para dentina radicular. Entre as limitações do estudo destacam-se o delineamento in vitro, a ausência de fatores biológicos do ambiente bucal e a redução do número de amostras em alguns tempos experimentais devido à perda de espécimes durante o protocolo. Conclui-se que os desafios ácido-abrasivos foram capazes de induzir desgaste dental progressivo e que o escaneamento intraoral associado à análise tridimensional constitui uma abordagem promissora para o monitoramento longitudinal do desgaste dental em modelos experimentais, permitindo a detecção de alterações estruturais cumulativas decorrente desses desafios.

Palavras-chave: Erosão dentária; Imagem tridimensional; Abrasão dentária.

Altamirano L. Three-dimensional longitudinal assessment of acid-abrasive dental wear and mineral loss: an exploratory in vitro study. [dissertação de mestrado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2026.

ABSTRACT

Erosive tooth wear is a multifactorial condition characterized by the progressive loss of dental hard tissues caused by chemical and mechanical processes. Repeated exposure to gastric acid, frequently followed by immediate toothbrushing, may accelerate this process and is commonly observed in patients with bulimia nervosa. The aim of this study was to longitudinally evaluate dental wear induced by acid-abrasive challenges and its possible mineral alterations using three-dimensional analysis based on intraoral scanning. In this in vitro experimental study, bovine teeth were prepared and mounted in acrylic arches containing regions of interest in enamel and root dentin. The specimens were subjected to daily cycles of acid challenge using a simulated gastric acid solution followed by standardized toothbrushing. Dental wear was longitudinally monitored through three-dimensional intraoral scanning at different experimental time points. Selected samples were removed throughout the experiment for morphological evaluation and determination of mineral composition by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The results demonstrated progression of dental wear throughout the experimental cycles, with a gradual increase in the proportion of surfaces showing structural loss detectable by the scanner. Both enamel and root dentin exhibited wear, with similar mean magnitude between tissues, although differences were observed in variability patterns and temporal progression. Mineral analysis indicated greater stability of the Ca/P ratio in enamel and higher variability in the results obtained for root dentin. Study limitations include the in vitro design, the absence of biological factors present in the oral environment, and the reduction in the number of samples at certain experimental time points due to specimen loss during the protocol. It can be concluded that acid-abrasive challenges were capable of inducing progressive dental wear and that intraoral scanning associated with three-dimensional analysis represents a promising approach for longitudinal monitoring of dental wear in experimental models, enabling the detection of cumulative structural changes resulting from these challenges.

Keywords: Dental erosion; Three-dimensional image; Dental abrasion.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 PROPOSIÇÃO	12
2.1 Objetivos específicos	12
2.2 Hipótese do estudo	12
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	13
4 MATERIAL E MÉTODO	16
4.1 Delineamento experimental	16
4.2 Cálculo do tamanho amostral.....	16
4.3 Seleção, limpeza e preparo das amostras	17
4.4 Distribuição dos grupos experimentais.....	17
4.5 Preparo da solução de ácido gástrico simulado.....	18
4.6 Protocolo de desafio erosivo.....	18
4.7 Protocolo de escovação.....	18
4.8 Aquisição das imagens tridimensionais.....	19
4.9 Obtenção dos espécimes e preparo para análise em MEV.....	19
4.10 Microscopia eletrônica de varredura e análise química	20
5 RESULTADOS	21
5.1 Detecção do desgaste considerando o limite operacional do scanner..	21
5.2 Desgaste dental em esmalte e dentina radicular	23
5.3 Progressão temporal do desgaste em esmalte e dentina	24
5.4 Alterações morfológicas da superfície dentária observadas por MEV..	28
5.5 Alteração na composição mineral das superfícies dentárias	29
5.6 Relação entre desgaste estrutural e composição mineral	32
5.7 Síntese dos principais achados	33
6 DISCUSSÃO	34
6.1 Desgaste dental associado a desafios ácido-abrasivos	34
6.2 Desgaste em esmalte e dentina radicular.....	35

6.3 Monitoramento tridimensional do desgaste dental	36
6.4 Implicações clínicas	37
6.5 Limitações do estudo	37
6.6 Perspectivas futuras	38
 7 CONCLUSÃO.....	 39
 REFERÊNCIAS	 40
 ANEXO.....	 44

1 INTRODUÇÃO

Os transtornos alimentares constituem um grupo de condições psiquiátricas caracterizadas por alterações persistentes no comportamento alimentar e na percepção da imagem corporal, frequentemente associadas a repercussões sistêmicas e orais. Entre esses distúrbios, a bulimia nervosa destaca-se pela ocorrência de episódios recorrentes de compulsão alimentar seguidos de comportamentos compensatórios inadequados, como vômitos autoinduzidos. Esses episódios resultam na exposição repetida da cavidade oral ao conteúdo gástrico altamente ácido, podendo causar alterações significativas nos tecidos dentários^{1,2}.

A presença frequente de ácido gástrico na cavidade oral constitui um importante fator etiológico para o desenvolvimento de erosão dental. Esse processo caracteriza-se pela perda irreversível de tecido dentário mineralizado decorrente de processos químicos não mediados por bactérias. A dissolução da hidroxiapatita ocorre quando o pH do meio bucal atinge níveis inferiores ao pH crítico do esmalte dental, resultando em desmineralização progressiva da superfície dentária³.

Nos últimos anos, o desgaste erosivo dental tem sido reconhecido como uma condição multifatorial e de elevada relevância clínica. O desgaste erosivo representa uma doença oral caracterizada pela interação complexa entre fatores biológicos, químicos e comportamentais⁴, envolvendo processos de desmineralização ácida, abrasão mecânica e modificações estruturais dos tecidos dentários. Nesse contexto, o termo erosive tooth wear tem sido utilizado para descrever a perda cumulativa de tecido dentário decorrente da interação entre erosão e outros mecanismos de desgaste.

O processo erosivo inicia-se com a dissolução mineral da camada superficial do esmalte, resultando em amolecimento da superfície dental. Essa camada parcialmente desmineralizada apresenta menor dureza e maior susceptibilidade à remoção mecânica. Em situações clínicas, esse fenômeno frequentemente ocorre em associação com forças mecânicas, como aquelas geradas durante a escovação dental, caracterizando o desgaste erosivo-abrasivo³.

A interação entre erosão e abrasão tem sido amplamente investigada na literatura odontológica. Estudos experimentais demonstram que superfícies dentárias previamente expostas a desafios ácidos tornam-se mais suscetíveis à abrasão mecânica. Nesse contexto, bebidas ácidas apresentam potencial erosivo significativo

sobre o esmalte dental, promovendo perda de estrutura mineral. A desmineralização inicial resultante da ação ácida reduz a resistência mecânica da superfície dentária, tornando o tecido mais vulnerável a forças abrasivas subsequentes⁵.

Além disso, diferentes agentes presentes nos dentífricos podem influenciar a progressão do desgaste erosivo-abrasivo. Compostos contendo fluoreto, por exemplo, podem promover a formação de depósitos semelhantes ao fluoreto de cálcio (CaF_2) na superfície dental, os quais atuam como reservatórios de flúor e contribuem para reduzir a dissolução ácida e aumentar a resistência do esmalte à abrasão. Nesse contexto, aplicações tópicas de fluoretos podem desempenhar papel importante na redução da desmineralização e na prevenção da progressão de lesões erosivas⁵.

A prevalência do desgaste erosivo dental tem aumentado nas últimas décadas e atualmente representa um problema relevante de saúde bucal em diferentes faixas etárias. Em resposta a essa crescente prevalência, o índice Basic Erosive Wear Examination (BEWE) foi proposto como ferramenta clínica padronizada para avaliação do desgaste erosivo dental, permitindo classificar a severidade das lesões e orientar estratégias preventivas e terapêuticas⁶.

Apesar da relevância clínica do desgaste erosivo dental, o diagnóstico precoce dessas alterações ainda representa um desafio. Tradicionalmente, o monitoramento do desgaste dental baseia-se em exame clínico visual, fotografias clínicas e análise de modelos de gesso. Entretanto, esses métodos apresentam limitações importantes, incluindo baixa sensibilidade para detectar pequenas alterações estruturais e elevada variabilidade entre examinadores.

Nesse contexto, o avanço das tecnologias digitais tem ampliado as possibilidades de diagnóstico e monitoramento do desgaste dental. O uso de scanners intraorais permite a obtenção de modelos tridimensionais digitais das superfícies dentárias com alta precisão. Esses modelos podem ser comparados ao longo do tempo por meio de técnicas de sobreposição tridimensional, possibilitando a detecção de pequenas alterações volumétricas na superfície dental⁷.

A análise tridimensional da superfície dentária representa uma ferramenta promissora para monitoramento longitudinal do desgaste dental. Estudos recentes demonstram que a comparação de modelos tridimensionais obtidos em diferentes momentos pode permitir quantificação precisa da perda estrutural do esmalte e da dentina ao longo do tempo. Métodos de análise tridimensional da superfície dental

podem fornecer informações quantitativas relevantes para avaliação da progressão do desgaste dental⁸.

Além da análise tridimensional do desgaste, métodos laboratoriais complementares podem ser utilizados para investigar alterações morfológicas e mineralógicas dos tecidos dentários. A microscopia eletrônica de varredura permite avaliar alterações topográficas da superfície dental em diferentes estágios do processo erosivo, enquanto a espectroscopia por energia dispersiva de raios X possibilita a análise da composição mineral dos tecidos dentários, incluindo a proporção entre cálcio e fósforo.

Embora diversos estudos tenham investigado separadamente os processos de erosão dental, abrasão mecânica e métodos digitais de monitoramento do desgaste, ainda existem lacunas na literatura quanto à integração dessas abordagens em modelos experimentais que simulem condições clínicas complexas, como aquelas observadas em indivíduos com bulimia nervosa.

A utilização combinada de análise tridimensional por scanner intraoral com métodos laboratoriais de caracterização morfológica e química pode contribuir para uma compreensão mais abrangente dos mecanismos envolvidos no desgaste dental associado a desafios ácido-abrasivos. A investigação integrada dessas metodologias pode fornecer evidências relevantes para o desenvolvimento de estratégias de diagnóstico e monitoramento mais sensíveis para o desgaste dental.

Diante desse contexto, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar longitudinalmente o desgaste dental induzido por desafios ácido-abrasivos simulando exposição ao ácido gástrico, utilizando análise tridimensional por scanner intraoral associada a métodos laboratoriais complementares para investigação das alterações morfológicas e mineralógicas dos tecidos dentários.

2 PROPOSIÇÃO

Avaliar longitudinalmente o desgaste dental induzido por desafios ácido-abrasivos simulando exposição ao ácido gástrico e escovação dental, por meio de análise tridimensional utilizando scanner intraoral, associada a métodos laboratoriais de caracterização morfológica e mineralógica dos tecidos dentários.

2.1 Objetivos específicos

- I. Quantificar o desgaste estrutural do esmalte e da dentina submetidos a desafios ácido-abrasivos utilizando análise tridimensional por scanner intraoral;
- II. Avaliar a progressão temporal do desgaste dental ao longo dos ciclos experimentais;
- III. Investigar alterações morfológicas da superfície dental decorrentes do desafio ácido-abrasivo por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- IV. Determinar alterações na composição mineral dos tecidos dentários, com ênfase na relação cálcio/fósforo (Ca/P), por meio de espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS);
- V. Correlacionar os valores de desgaste estrutural obtidos pela análise tridimensional com as alterações morfológicas e mineralógicas observadas nos tecidos dentários.

2.2 Hipótese do estudo

A hipótese do presente estudo é que desafios ácido-abrasivos simulando exposição ao ácido gástrico associados à escovação dental, representando condições frequentemente observadas em pacientes com bulimia nervosa, promovem desgaste progressivo da estrutura dental detectável por análise tridimensional, acompanhado por alterações morfológicas superficiais e modificações na composição mineral dos tecidos dentários. Adicionalmente, supõe-se que o uso de um dentifrício com tecnologia remineralizante possa modificar a magnitude e/ou a progressão desse desgaste quando comparado a um dentifrício fluoretado convencional.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A relação entre transtornos alimentares e a integridade dos tecidos dentais é amplamente documentada na literatura contemporânea. Revisões sistemáticas recentes estabeleceram uma correlação significativa entre a bulimia nervosa e a prevalência de erosão dentária, destacando que pacientes com comportamentos purgativos apresentam riscos elevados de perda estrutural severa⁹. Estudos clínicos também demonstraram alta prevalência de erosões dentárias em pacientes com histórico de vômito autoinduzido, frequentemente localizadas nas superfícies palatinas dos dentes anteriores superiores, sendo observada associação entre maior duração do comportamento de vômito e maior número e severidade das lesões erosivas¹⁰.

No cenário nacional, a doença do refluxo gastroesofágico (DRGE) afeta cerca de 12% da população brasileira e constitui importante problema de saúde pública¹¹. O refluxo do conteúdo gástrico para a cavidade oral pode representar uma fonte intrínseca de ácidos, capaz de contribuir para processos de biocorrosão dentária. Atualizações recentes do Consenso de Lyon reforçam a importância de métodos objetivos no diagnóstico da DRGE, destacando o uso do monitoramento ambulatorial do pH esofágico e da impedanciometria para a identificação e quantificação dos episódios de refluxo ácido¹². Dessa forma, a exposição frequente das estruturas orais ao conteúdo gástrico ácido pode constituir um fator intrínseco relevante associado ao desenvolvimento de biocorrosão dentária.

Os mecanismos histopatológicos da erosão dental envolvem a dissolução química dos cristais de hidroxiapatita sem participação bacteriana, resultando em uma camada superficial amolecida e altamente suscetível à remoção mecânica¹³. Métodos de mensuração dessa perda tecidual têm sido amplamente investigados, sendo a transição entre o desgaste subvisual e a perda volumétrica mensurável um dos principais desafios para o diagnóstico precoce da erosão dental¹⁴.

A evolução tecnológica dos scanners intraorais permitiu novas abordagens diagnósticas. Estudos experimentais demonstraram que a acurácia dos modelos digitais obtidos por escaneamento intraoral depende da tecnologia de captura utilizada¹⁵. Investigações adicionais sobre veracidade e precisão de scanners intraorais indicam que sistemas baseados em triangulação óptica e microscopia confocal apresentam melhor desempenho na detecção de alterações superficiais¹⁶.

A aplicação dos scanners intraorais no monitoramento do desgaste dentário tem sido amplamente investigada. Estudos experimentais demonstraram que a quantificação da perda de tecido baseada em impressões digitais apresenta resultados próximos aos obtidos por profilometria óptica, com desvios geralmente inferiores a 10%¹⁷. Entretanto, limitações na detecção de desgastes erosivos em estágios extremamente iniciais ainda são relatadas, especialmente para perdas estruturais inferiores a 50 μm ¹⁸. Além disso, o uso de softwares de monitoramento longitudinal, como o TRIOS Patient Monitoring, tem sido descrito como ferramenta promissora para o acompanhamento clínico da progressão do desgaste dental¹⁹.

No campo da terapêutica mineral, estudos experimentais investigaram o efeito de dentifrícios rotulados como regeneradores sobre superfícies dentárias erodidas, observando que esses produtos não apresentaram desempenho superior ao dentifrício indicado para controle da erosão e que seus efeitos dependem da composição e abrasividade da formulação²⁰. A tecnologia baseada em fosfosilicato de cálcio e sódio fundamenta-se na liberação de íons cálcio e fosfato que, em contato com o meio aquoso, promovem a formação de uma camada de hidroxí-carbonato de apatita sobre a dentina e o esmalte^{21,22}. A deposição desses íons na estrutura dental e sua contribuição para a oclusão de túbulos dentinários também foram demonstradas experimentalmente²³.

A eficácia clínica dessa tecnologia também foi demonstrada em estudos clínicos que observaram reduções significativas na hipersensibilidade dentinária e elevada capacidade de oclusão de túbulos dentinários, atribuídas à formação de uma camada mineral rica em hidroxí-carbonato de apatita^{24,25}.

Estudos experimentais compararam o efeito de nanopartículas de sílica mesoporosa de cálcio com agentes convencionais à base de fluoreto, demonstrando que esse sistema bioativo apresentou eficácia semelhante à de NaF e TiF_4 na redução da perda de estrutura dentária após desafio erosivo²⁶.

Revisões sistemáticas de estudos laboratoriais demonstraram que biomateriais à base de vidro bioativo e hidroxiapatita apresentam elevada capacidade de oclusão de túbulos dentinários, reforçando o potencial desses compostos no controle da hipersensibilidade dentinária²⁷. Para a avaliação crítica da qualidade metodológica de estudos in vitro com materiais odontológicos, foi desenvolvida uma ferramenta específica que estabelece critérios sistemáticos para identificação e redução do risco de viés nesse tipo de investigação²⁸.

Estudos experimentais indicam que a capacidade tampão da saliva é limitada frente a desafios ácidos persistentes, como aqueles observados em indivíduos com bulimia, o que pode exigir intervenções preventivas adicionais²⁹. Investigações laboratoriais comparando o efeito do tetrafluoreto de titânio (TiF_4) e do fluoreto de sódio (NaF) em condições de pH extremamente baixo demonstraram que o TiF_4 promove a formação de uma camada acidorresistente mais estável sobre a superfície do esmalte³⁰.

Pesquisas recentes investigaram os efeitos de agentes dessensibilizantes sobre a oclusão de túbulos dentinários, permeabilidade dentinária e alterações na composição mineral, reforçando a necessidade de tecnologias capazes de preservar a integridade mineral do tecido dentário ao longo do tempo^{31,32}. Evidências experimentais iniciais demonstraram que compostos contendo fosfosilicato de cálcio e sódio podem atuar como agentes bioativos capazes de induzir deposição mineral e formação de hidroxiapatita na superfície dentinária³³. Análises por microscopia eletrônica de varredura confirmaram a deposição mineral e a oclusão tubular promovidas por esses agentes na microestrutura dentinária³⁴.

Análises por microscopia eletrônica de varredura também permitiram descrever as características morfológicas dos diferentes tipos de desgaste dental em nível microscópico³⁵. Evidências experimentais indicam que os processos de atrição, abrasão e erosão raramente ocorrem de forma isolada, apresentando interação sinérgica na qual a desmineralização ácida aumenta a suscetibilidade do tecido dentário ao desgaste mecânico³⁶. Esses achados reforçam a importância de estudos que investiguem o desgaste dental considerando a interação entre diferentes mecanismos e utilizando métodos de avaliação tridimensional.

4 MATERIAL E MÉTODO

O presente estudo caracteriza-se como uma investigação laboratorial, experimental, longitudinal e controlada, desenvolvida com o objetivo de avaliar o desgaste dental induzido por desafios ácido-abrasivos simulando condições associadas à exposição repetida ao ácido gástrico seguida de escovação dental.

4.1 Delineamento experimental

O modelo experimental foi delineado para permitir o monitoramento longitudinal da perda estrutural dos tecidos dentários por meio de análise tridimensional utilizando scanner intraoral. Adicionalmente, análises laboratoriais complementares foram realizadas para caracterizar alterações morfológicas e mineralógicas associadas ao processo de desgaste dental.

O experimento foi conduzido ao longo de sete dias experimentais, durante os quais as amostras foram submetidas a ciclos diários de desafio ácido-abrasivo. Em intervalos previamente definidos foram realizadas aquisições tridimensionais das superfícies dentárias para quantificação do desgaste estrutural.

Além da análise tridimensional do desgaste dental, amostras selecionadas de forma aleatória foram submetidas à microscopia eletrônica de varredura (MEV) para análise morfológica da superfície dental e à espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS) para avaliação da composição mineral dos tecidos dentários.

4.2 Cálculo do tamanho amostral

O cálculo do tamanho amostral foi realizado previamente por meio do software G*Power (versão 3.1.9.7; Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Alemanha), considerando testes F para análise de variância de medidas repetidas com interação entre fatores intra e intergrupos.

Foram adotados nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), poder estatístico de 80% ($1-\beta = 0,80$) e tamanho de efeito médio ($f = 0,25$), conforme recomendações de Cohen. Foram considerados dois grupos experimentais e sete medições ao longo do tempo, assumindo correlação entre medidas repetidas de 0,5 e correção de não esfericidade igual a 1.

O cálculo estimou a necessidade mínima de 18 espécimes, resultando em 9 dentes por grupo, com poder estatístico real obtido de 0,836.

4.3 Seleção, limpeza e preparo das amostras

Foram utilizados 18 incisivos bovinos hígidos, obtidos de frigorífico local, seguindo as recomendações para utilização de tecidos dentários em estudos laboratoriais conforme a norma ISO/TS 11405:2015³⁷.

Inicialmente, os dentes foram submetidos à inspeção visual, sendo excluídos espécimes que apresentassem trincas, fraturas ou defeitos estruturais no esmalte.

Posteriormente foi realizada profilaxia utilizando pedra-pomes e água, com auxílio de escova de Robinson (Microdont, São Paulo, Brasil) em baixa rotação, com o objetivo de remover resíduos orgânicos e depósitos superficiais. Em seguida, os dentes foram acondicionados em cuba ultrassônica contendo água deionizada para remoção de detritos remanescentes aderidos às superfícies dentárias.

Após a etapa de limpeza, as superfícies proximais e incisais foram regularizadas com disco diamantado de dupla face (iDentLab, Brasil), sob irrigação constante. Essa padronização teve como objetivo permitir o adequado posicionamento dos incisivos bovinos nas arcadas do manequim utilizado no experimento.

Posteriormente, duas áreas experimentais de 5 × 5 mm foram demarcadas em cada dente com auxílio de sonda milimetrada, sendo uma localizada na região de esmalte e outra na região de dentina radicular. As áreas adjacentes foram protegidas com esmalte cosmético, a fim de delimitar a área experimental.

Cada área experimental foi subdividida em duas regiões por meio da aplicação de cola termoplástica, utilizada como barreira física temporária. Dessa forma, metade da área permaneceu protegida, funcionando como controle interno, enquanto a outra metade foi submetida aos desafios erosivos e abrasivos ao longo do experimento.

Após o preparo, os dentes foram posicionados em manequim odontológico e fixados utilizando barreira gengival Top Dam (FGM, Joinville, Brasil), garantindo estabilidade das amostras durante todo o protocolo experimental.

4.4 Distribuição dos grupos experimentais

Após o preparo das amostras, os dentes foram distribuídos aleatoriamente em dois grupos experimentais (n = 9), de acordo com o dentifrício utilizado.

G1 – Grupo Sensodyne: dentifrício reparador Sensodyne Repair & Protect (Haleon, Brasil)

G2 – Grupo Colgate: dentifrício fluoretado convencional Colgate Máxima Proteção Anticáries com Calci-Protect (Colgate-Palmolive, Brasil)

4.5 Preparo da solução de ácido gástrico simulado

A solução ácida utilizada para simulação do conteúdo gástrico foi preparada conforme protocolo descrito previamente na literatura³⁸. A solução simuladora de suco gástrico foi composta por cloreto de sódio, pepsina e ácido clorídrico dissolvidos em água deionizada.

O pH da solução foi ajustado para 1,30 e monitorado com medidor digital de pH (AK 90, AKSO, São Leopoldo, RS, Brasil). A estabilidade da acidez foi verificada ao longo do experimento.

Como controle adicional, fitas indicadoras de pH (Acquapex, Socorro, São Paulo, Brasil) foram utilizadas entre os ciclos erosivos para verificação da manutenção da acidez da solução.

4.6 Protocolo de desafio erosivo

Os espécimes foram submetidos a ciclos de desafio erosivo por meio da imersão em solução de ácido gástrico simulado durante 1 minuto por ciclo. Em cada dia experimental foram realizados quatro desafios erosivos, totalizando 28 ciclos ao longo de sete dias.

Entre os ciclos experimentais, os dentes foram mantidos em água deionizada, permanecendo armazenados nesse meio também durante o período noturno.

Todos os procedimentos experimentais foram conduzidos em temperatura ambiente.

4.7 Protocolo de escovação

Após cada desafio erosivo, os dentes foram removidos da solução ácida e enxaguados com água deionizada para remoção de resíduos da solução. Em seguida, foi realizada a escovação dentária.

A escovação foi realizada utilizando escova elétrica Sonicare (Philips Oral Healthcare). Para cada grupo experimental foi utilizada uma cabeça de escova específica, evitando contaminação cruzada entre os dentifrícios.

O dentifrício foi aplicado na forma de slurry na proporção 1:1 (dentifrício:água deionizada), preparado imediatamente antes de cada sessão de escovação.

A escovação foi realizada quatro vezes ao dia, imediatamente após cada desafio ácido, com tempo total de dois minutos por escovação, correspondente à higienização de toda a arcada experimental composta por nove dentes.

A escova elétrica empregada possui sistema automático de controle de pressão que reduz ou interrompe a vibração quando uma força excessiva é aplicada. Dessa forma, embora não tenha sido realizada mensuração contínua da força aplicada durante todo o procedimento, assegurou-se que o limite máximo de pressão recomendado pelo fabricante não fosse ultrapassado.

Após a escovação, os espécimes eram novamente enxaguados com água deionizada e retornavam ao meio de armazenamento.

4.8 Aquisição das imagens tridimensionais

A análise da perda estrutural foi realizada por meio de escaneamento tridimensional utilizando scanner intraoral SIRIOS (Straumann, Basel, Suíça), equipado com tecnologia de estereoscopia multimodular baseada em luz estruturada, com precisão triaxial de 20 µm.

Os escaneamentos foram realizados diariamente antes do primeiro desafio ácido do dia, permitindo monitoramento longitudinal da progressão do desgaste dental.

Um escaneamento inicial (T0) foi realizado antes do início dos ciclos experimentais. Nos dias subsequentes foram realizadas aquisições correspondentes aos tempos T1 a T7.

Os modelos tridimensionais obtidos foram exportados em formato STL e analisados no software Materialise 3-matic Medical 13.0 (Materialise NV, Leuven, Bélgica) para quantificação da perda estrutural por meio de sobreposição de superfícies.

4.9 Obtenção dos espécimes e preparo para análise em MEV

Ao final dos sete dias experimentais, os dentes foram removidos do manequim para obtenção dos espécimes destinados às análises microestruturais.

Inicialmente, cada dente foi seccionado utilizando disco diamantado de dupla face (iDentLab, Brasil), sob irrigação, permitindo a obtenção de dois espécimes por

dente, correspondentes aos substratos de esmalte e dentina radicular. Dessa forma, foram obtidos 36 espécimes com dimensões aproximadas de 5 × 5 mm.

Após o seccionamento, foi realizada uma marcação na região correspondente à área previamente protegida utilizando ponta diamantada esférica 4138 (KG Sorensen, Brasil), com o objetivo de permitir a identificação precisa da área controle durante as análises em microscopia eletrônica de varredura.

Posteriormente, os espécimes foram submetidos ao protocolo de desidratação para preparo das análises em microscopia eletrônica. Para isso, as amostras foram imersas em séries crescentes de etanol nas concentrações de 30%, 40%, 50%, 70%, 90%, 95% e 100%, permanecendo por 10 minutos em cada concentração, conforme protocolos clássicos de preservação microestrutural³⁹.

Após a etapa de desidratação, os espécimes foram preparados para análise em microscópio eletrônico de varredura.

4.10 Microscopia eletrônica de varredura e análise química

A análise morfológica das superfícies dentárias foi realizada em microscópio eletrônico de varredura (JSM 7500, JEOL, Tóquio, Japão), operando a 20 kV.

As imagens foram obtidas em aumentos baixos (100×) para visualização geral da superfície e em aumentos elevados (1000×, 2500× e 5000×) para análise detalhada das alterações microestruturais do esmalte e da dentina.

A composição química superficial foi avaliada por meio de espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura, permitindo a identificação e quantificação dos elementos minerais presentes nas superfícies dentárias.

5 RESULTADO

Os resultados obtidos no presente estudo são apresentados a seguir de forma descritiva, contemplando as análises tridimensionais do desgaste dental e as avaliações mineralógicas realizadas por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS). Inicialmente são apresentados os resultados relacionados à detecção do desgaste considerando o limite operacional do scanner utilizado. Em seguida, são descritas as análises do desgaste em esmalte e dentina radicular ao longo do tempo experimental, bem como as alterações observadas na composição mineral dos tecidos dentários.

5.1 Detecção do desgaste dental considerando o limite operacional do scanner

A análise tridimensional foi realizada utilizando o scanner intraoral Sirius, adotando-se como referência o limite operacional de detecção (LOD) de 0,068 mm. A interpretação dos dados foi baseada não apenas nos valores médios de desgaste, mas também na proporção de superfícies cuja perda estrutural ultrapassou esse limite.

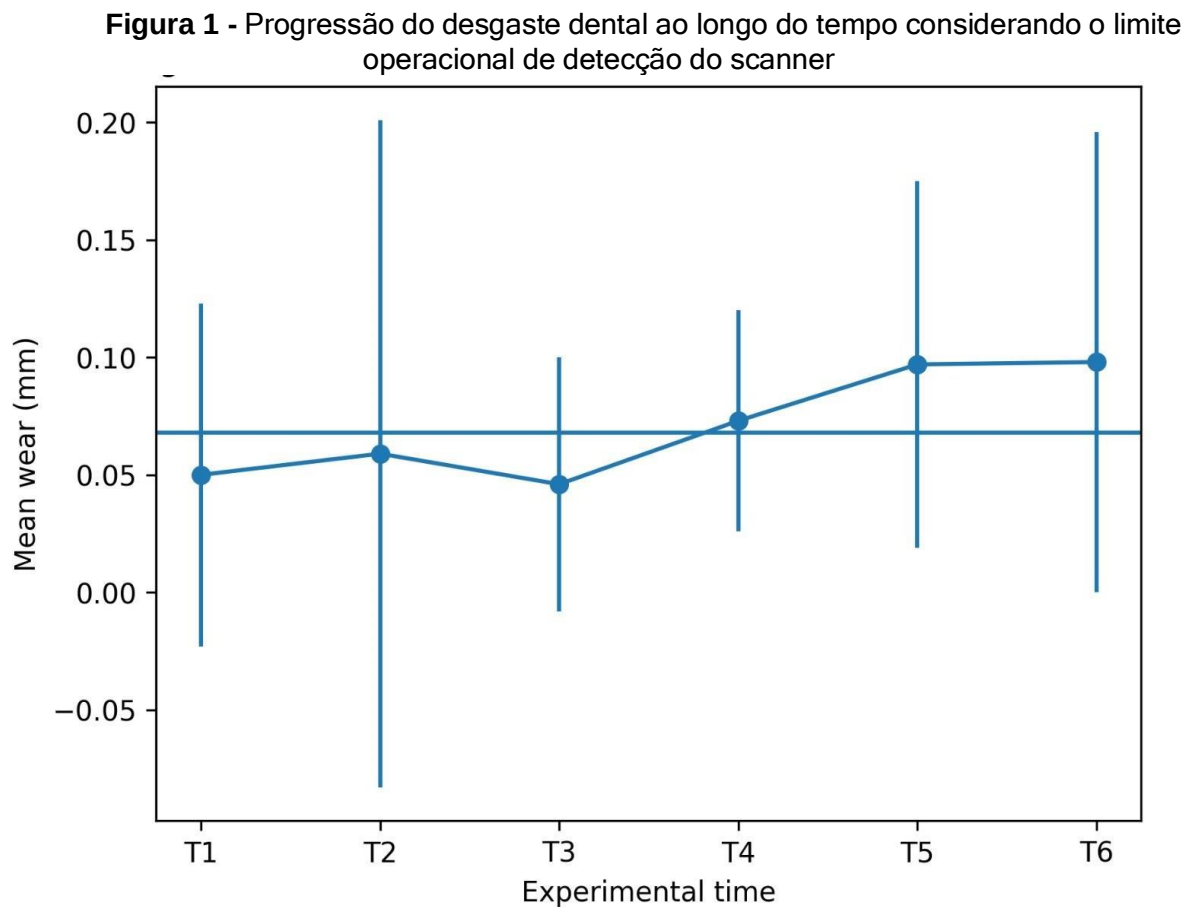
A Tabela 1 mostra que, nos tempos iniciais do experimento, a maior parte das medições permaneceu abaixo do limite de detecção do equipamento. Entretanto, ao longo da progressão dos ciclos ácido-abrasivos, observou-se aumento gradual tanto do desgaste médio quanto da porcentagem de superfícies com desgaste detectável.

Tabela 1 - Detecção de desgaste acima do limite operacional do scanner

Tempo	n	n detectado	% acima do LOD médio (mm)	Desgaste médio (mm)	DP (mm)
T1	34	7	20,6	0,050	0,073
T2	30	10	33,3	0,059	0,142
T3	26	8	30,8	0,046	0,054
T4	22	9	40,9	0,073	0,047
T5	20	10	50,0	0,097	0,078

Fonte: Elaboração própria.

Esses dados mostram que o desgaste mensurado pelo scanner apresentou comportamento cumulativo ao longo do tempo, com maior frequência de valores detectáveis a partir de T4. Em T5, metade das superfícies analisadas já apresentava desgaste acima do limite de detecção do equipamento.



Fonte: Elaboração própria.

A figura evidencia que os valores médios de desgaste se mantêm próximos ao LOD nos tempos iniciais, tornando-se mais claramente detectáveis nos tempos intermediários e finais. Essa representação é particularmente importante porque demonstra que o método tridimensional foi sensível o suficiente para acompanhar o processo de perda estrutural em um modelo de desafio ácido-abrasivo.

5.2 Desgaste dental em esmalte e dentina radicular

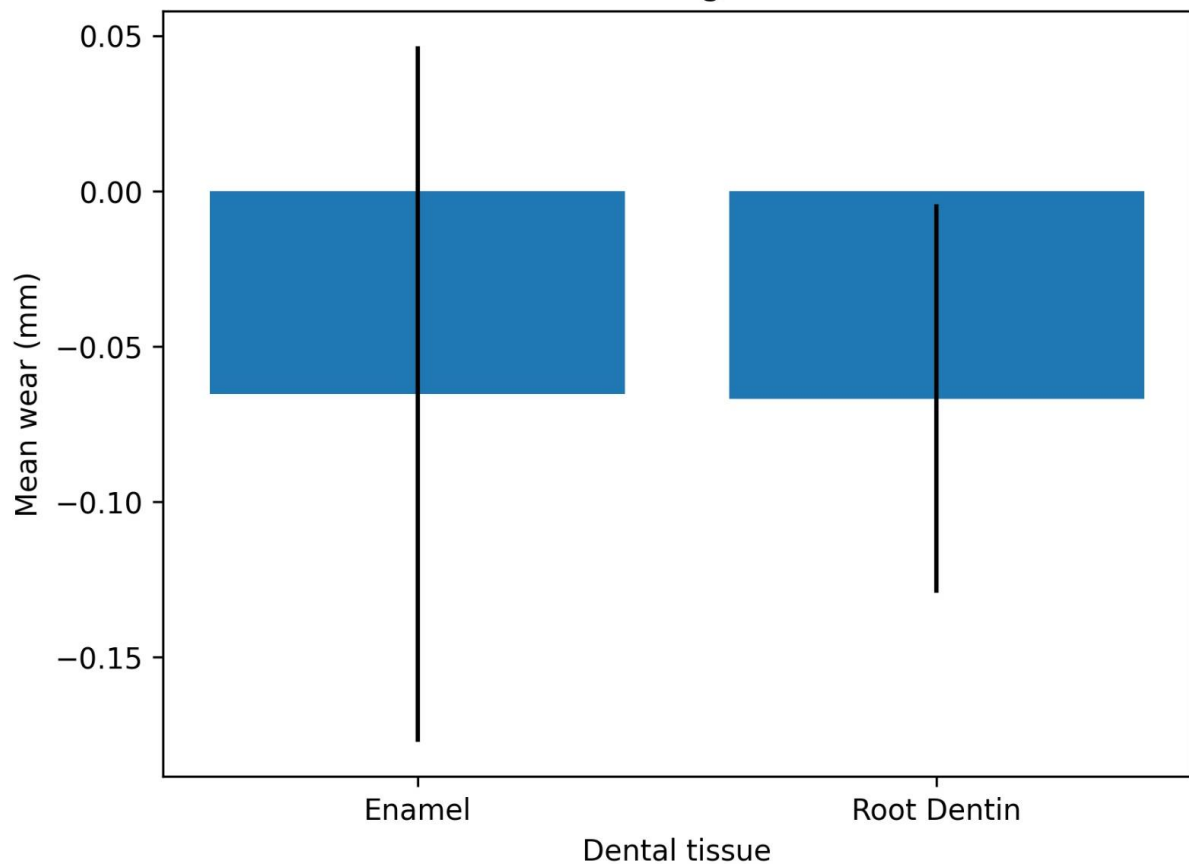
A análise global por tecido mostrou que tanto o esmalte quanto a dentina radicular apresentaram perda estrutural ao longo do experimento. Quando considerados todos os tempos conjuntamente, os valores médios de desgaste foram semelhantes entre os dois tecidos, porém com comportamento distinto em termos de dispersão.

Tabela 2 - Desgaste médio global por tecido dentário

Tecido	n	Média (mm)	DP (mm)
Esmalte	74	0,065	0,112
Dentina radicular	74	0,067	0,062

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que a média global de desgaste foi próxima entre os dois tecidos. No entanto, o esmalte apresentou maior dispersão dos valores, refletida em maior desvio-padrão, enquanto a dentina radicular mostrou comportamento mais homogêneo.

Figura 2 - Desgaste médio observado em esmalte e dentina

Fonte: Elaboração própria.

Essa figura é útil para mostrar que a contribuição científica da dissertação não está apenas em demonstrar que houve desgaste, mas em mostrar que a resposta estrutural dos tecidos pode diferir em variabilidade e progressão, mesmo quando as médias globais são próximas.

5.3 Progressão temporal do desgaste em esmalte e dentina radicular

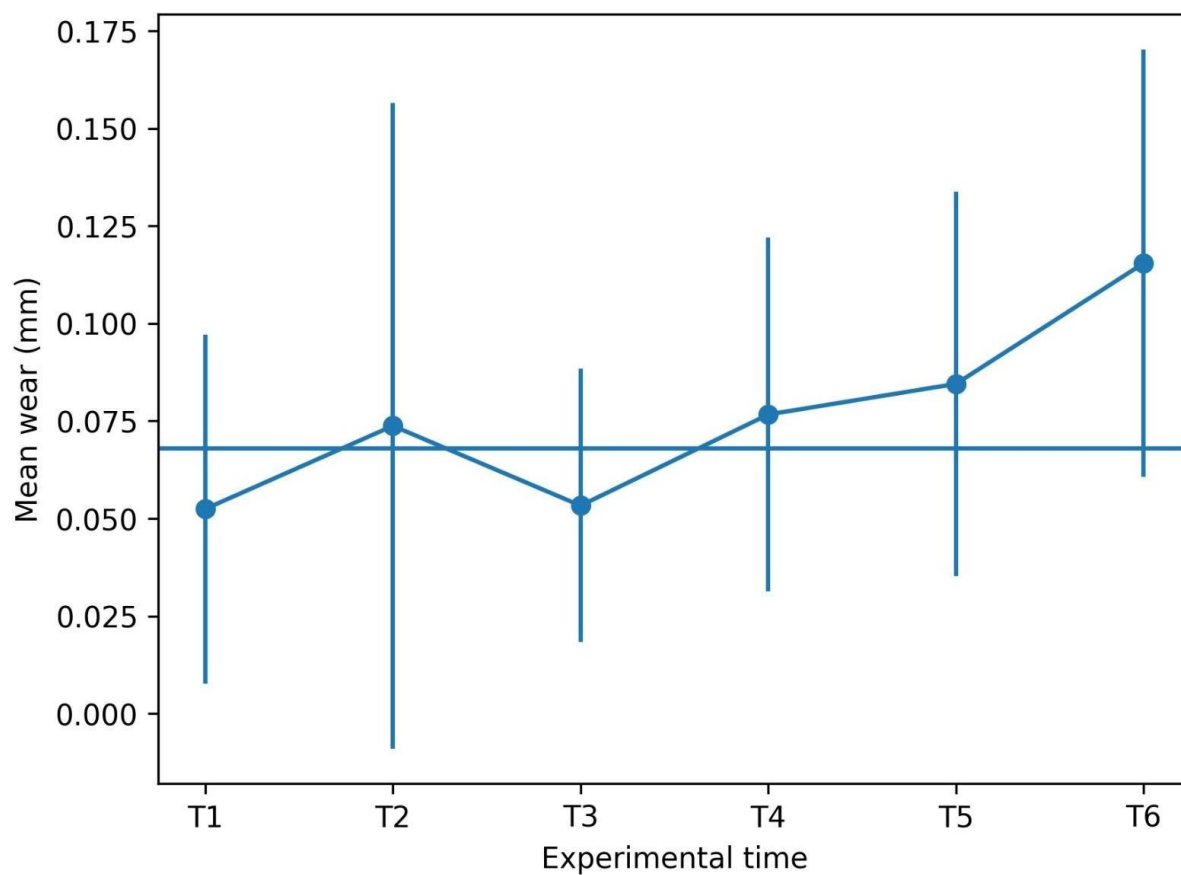
Para melhor compreensão da dinâmica do desgaste, os dados foram analisados separadamente por tecido e por tempo experimental.

Tabela 3 - Desgaste médio por tecido e tempo experimental

Tecido	Tempo	n	Média	DP
		(mm)		(mm)
Esmalte	T1	17	0,060	0,087
Esmalte	T2	15	0,089	0,167
Esmalte	T3	13	0,058	0,052
Esmalte	T4	11	0,073	0,045
Esmalte	T5	10	0,109	0,101
Esmalte	T6	8	0,120	0,090
Dentina radicular	T1	17	0,052	0,045
Dentina radicular	T2	15	0,074	0,083
Dentina radicular	T3	13	0,053	0,035
Dentina radicular	T4	11	0,077	0,045
Dentina radicular	T5	10	0,085	0,049
Dentina radicular	T6	8	0,115	0,055

Fonte: Elaboração própria.

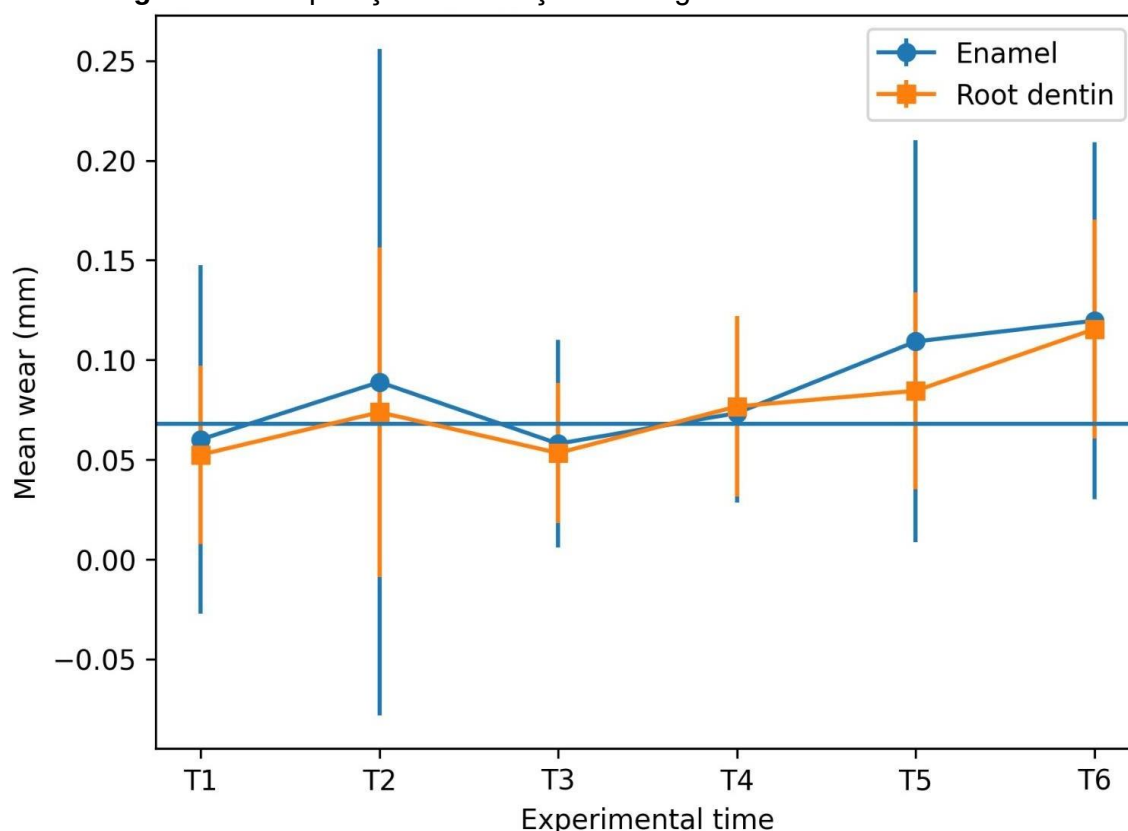
Os dados mostram que ambos os tecidos apresentaram tendência de aumento do desgaste ao longo do tempo experimental. No esmalte, os maiores valores médios foram observados em T5 e T6. Na dentina radicular, observou-se aumento progressivo com maior regularidade, culminando também em maior desgaste médio em T6.

Figura 3 - Progressão temporal do desgaste médio em dentina radicular

Fonte: Elaboração própria.

A figura específica da dentina radicular destaca que o desgaste nesse tecido se torna mais evidente ao longo dos ciclos experimentais, ultrapassando o limite de detecção do scanner nos tempos finais.

Figura 4 - Comparação da evolução do desgaste entre esmalte e dentina radicular



Fonte: Elaboração própria.

Essa figura é uma das mais importantes da dissertação porque mostra, de forma longitudinal, a evolução paralela do desgaste nos dois tecidos. Observa-se que:

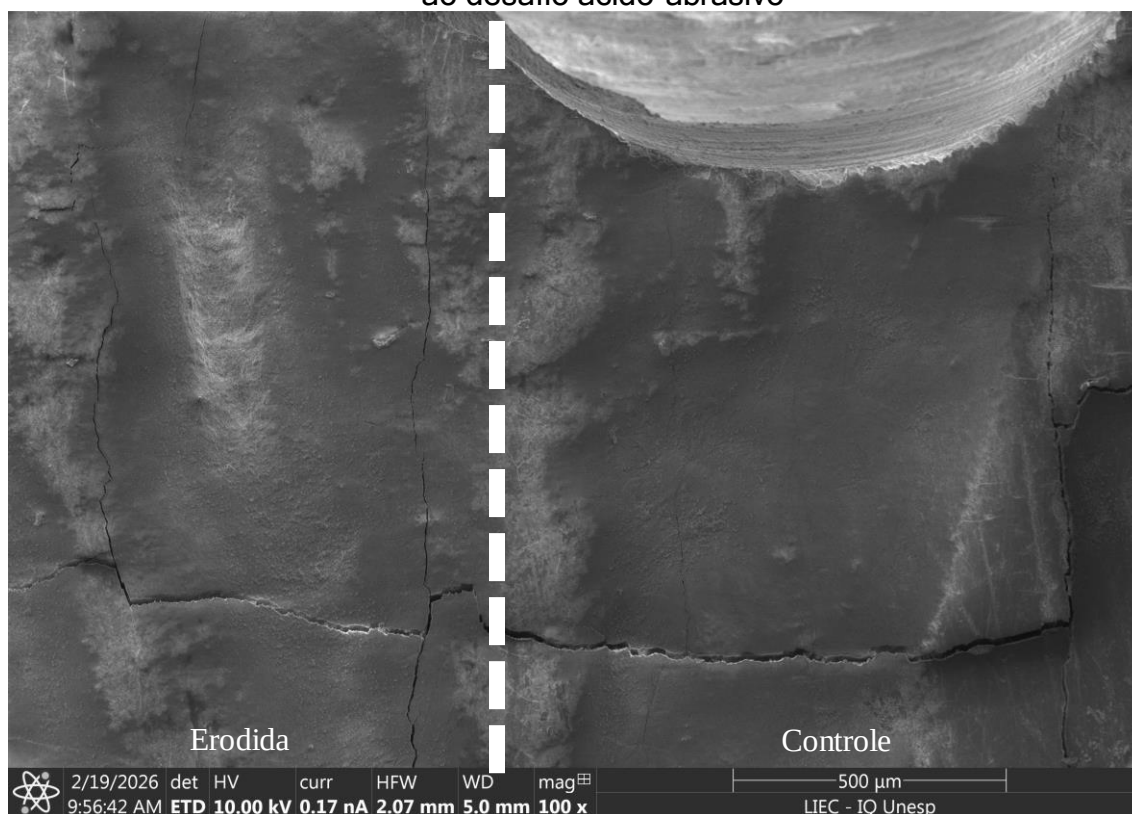
- I. ambos os tecidos apresentaram aumento de desgaste ao longo do tempo;
- II. os valores médios foram próximos em vários momentos;
- III. o esmalte mostrou maior dispersão em alguns tempos, especialmente em T2 e T5;
- IV. a dentina radicular apresentou evolução mais uniforme, com aumento gradual até T6.

Essa comparação fortalece a contribuição científica do estudo ao demonstrar que o scanner intraoral foi capaz de acompanhar a progressão do desgaste em dois substratos biologicamente distintos.

5.4 Alterações morfológicas da superfície dentária observadas por MEV

Para complementar a análise tridimensional do desgaste dental, foram realizadas observações morfológicas das superfícies dentárias por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As micrografias obtidas permitiram avaliar qualitativamente as alterações na topografia superficial do esmalte e da dentina radicular após os desafios ácido-abrasivos, bem como comparar as regiões controle preservadas com as áreas submetidas ao protocolo experimental.

Imagem 1 – Ilustra a região de transição entre a área controle e a área submetida ao desafio ácido-abrasivo



Fonte: Instituto de Química - Unesp.

A Imagem 1 apresenta a micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), evidenciando a transição entre a área controle e a área submetida ao desafio ácido-abrasivo. A região controle apresenta superfície relativamente lisa e homogênea, indicando preservação da morfologia do esmalte. Por outro lado, a área erodida mostra superfície mais irregular, com perda de uniformidade e alterações topográficas compatíveis com desgaste erosivo

5.5 Alterações na composição mineral das superfícies dentárias

A composição mineral foi avaliada por EDS, com ênfase na quantificação de cálcio (Ca), fósforo (P) e na relação Ca/P. Devido ao número reduzido e heterogêneo de amostras em alguns tempos experimentais, essa análise deve ser interpretada como descritiva e exploratória, especialmente para dentina radicular.

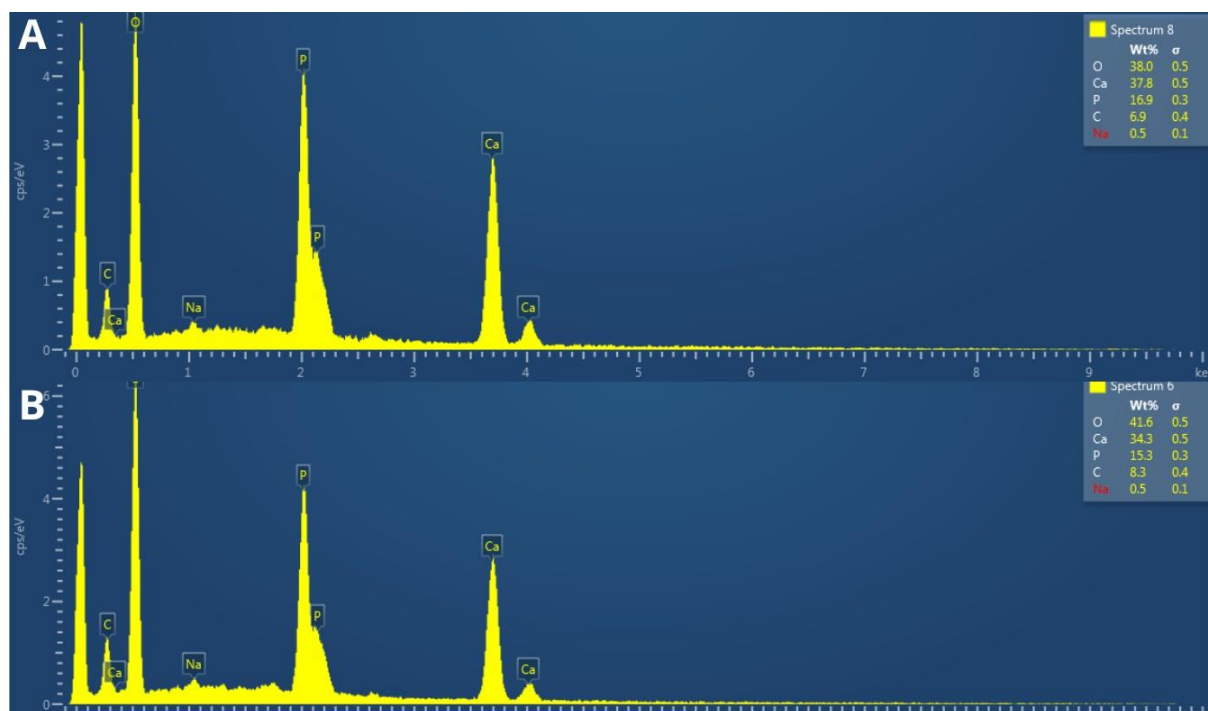
Tabela 4 - Composição mineral média por tecido e tempo experimental

Tecido	Tempo	Ca (wt%) médio	P (wt%) médio	Ca/P médio	n
Esmalte	T1	37,850	16,800	2,255	2
Esmalte	T2	35,200	16,125	2,182	4
Esmalte	T3	37,400	16,350	2,290	4
Esmalte	T4	34,350	15,750	2,180	2
Esmalte	T5	37,800	16,900	2,240	1
Esmalte	T6	34,250	15,350	2,230	2
Dentina radicular	T1	13,825	6,225	2,412	4
Dentina radicular	T2	16,800	6,450	1,520*	2
Dentina radicular	T3	13,067	3,900	2,340*	3
Dentina radicular	T4	5,000	0,000	—	2
Dentina radicular	T5	8,200	0,633	8,890	3
Dentina radicular	T6	8,300	0,550	18,400	2

* Em alguns tempos, a razão Ca/P foi calculada com base em número muito reduzido de observações válidas.

Fonte: Elaboração própria.

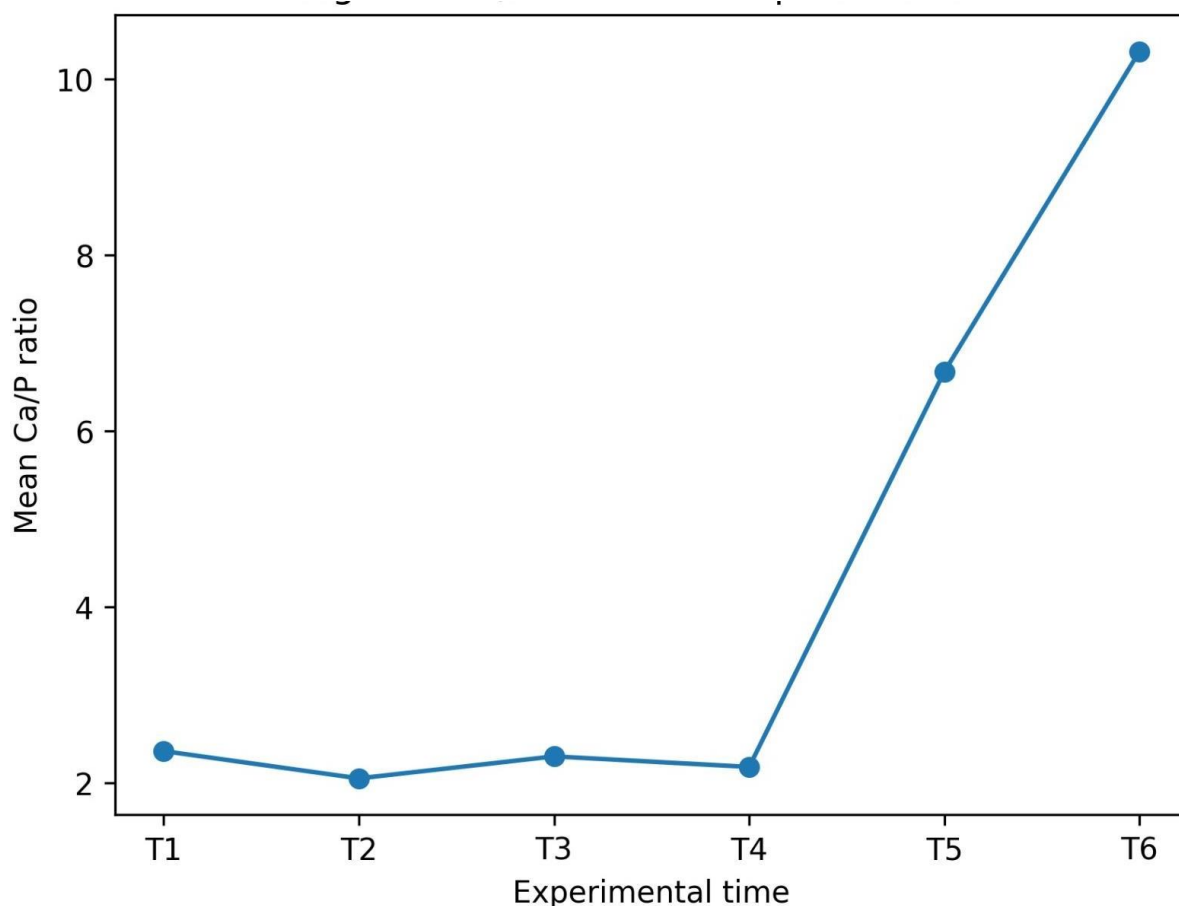
Figura 5 – Apresenta os espectros de EDS do esmalte na área atacada comparando os dois dentifrícios no mesmo tempo experimental.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 5 apresenta os espectros obtidos por EDS em superfícies de esmalte submetidas ao desafio ácido-abrasivo e tratadas com diferentes dentifrícios. Em ambos os espectros observam-se picos característicos de cálcio (Ca) e fósforo (P), elementos constituintes da hidroxiapatita do esmalte dental. A presença desses elementos confirma a composição mineral predominante das superfícies analisadas após o protocolo experimental.

No esmalte, a razão Ca/P manteve-se relativamente estável ao longo do experimento, com pequenas oscilações entre aproximadamente 2,18 e 2,29. Já na dentina radicular, observou-se maior instabilidade dos valores, principalmente nos tempos finais, associada a reduções acentuadas nos valores médios de fósforo.

Figura 6 - Variação da razão Ca/P ao longo do tempo experimental

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 6 apresenta a variação da razão cálcio/fósforo (Ca/P) média ao longo dos tempos experimentais. Observa-se que, nos tempos iniciais do experimento (T1 a T4), os valores médios da razão Ca/P permaneceram relativamente estáveis, sem variações expressivas entre os períodos avaliados.

Nos tempos experimentais finais (T5 e T6), observa-se aumento acentuado da razão Ca/P média. Entretanto, essa elevação deve ser interpretada com cautela. A análise detalhada dos dados apresentados na Tabela 4 indica que esses valores elevados estão associados principalmente à redução dos valores detectados de fósforo em algumas amostras, especialmente nas análises realizadas em dentina radicular.

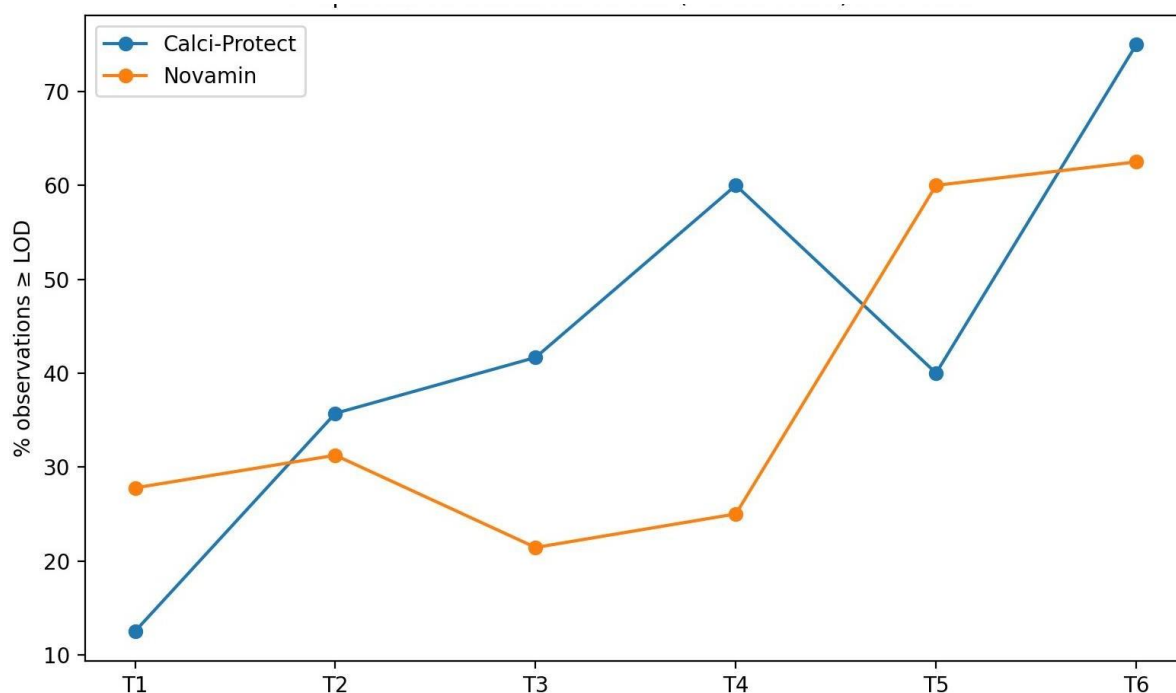
Além disso, o número reduzido de observações em determinados tempos experimentais e a heterogeneidade estrutural dos tecidos dentários analisados podem ter contribuído para maior variabilidade dos resultados obtidos por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS). Dessa forma, os dados apresentados na Figura

5 devem ser interpretados de maneira descritiva, indicando variações na razão Ca/P ao longo do experimento, sem evidência consistente de alteração sistemática da composição mineral dos tecidos dentários.

5.6 Relação entre desgaste estrutural e composição mineral

A comparação entre os dados de desgaste tridimensional e a razão Ca/P mostrou que as alterações mineralógicas não seguiram uma progressão linear tão clara quanto o desgaste estrutural. Enquanto os dados do scanner mostraram aumento mais consistente do desgaste ao longo dos tempos, os valores de Ca/P apresentaram maior variabilidade, especialmente para dentina radicular.

Figura 7 - Relação entre desgaste dental e razão Ca/P



Fonte: Elaboração própria.

A figura sugere que existe relação entre as duas dimensões analíticas do estudo, porém com comportamento mais disperso do que o observado para os dados tridimensionais. Isso indica que a análise química por EDS, embora importante para complementar a caracterização do processo de desgaste, apresentou maior sensibilidade à heterogeneidade das amostras.

5.7 Síntese dos principais achados

Considerando em conjunto as análises tridimensionais e mineralógicas, os principais achados do estudo foram:

- I. O modelo ácido-abrasivo foi capaz de induzir desgaste dental progressivo detectável por scanner intraoral.
- II. A proporção de superfícies com desgaste acima do limite operacional de detecção do scanner aumentou ao longo do tempo experimental.
- III. Esmalte e dentina radicular apresentaram desgaste de magnitude semelhante quando analisados globalmente, porém com perfis de dispersão distintos.
- IV. A análise longitudinal mostrou progressão do desgaste em ambos os tecidos, com maior clareza nos tempos finais.
- V. A análise por EDS revelou alterações na composição mineral, com maior estabilidade dos dados em esmalte e maior variabilidade em dentina radicular.

6 DISCUSSÃO

O presente estudo investigou, em modelo experimental *in vitro*, a progressão do desgaste dental induzido por desafios ácido-abrasivos cíclicos que simulam condições clínicas associadas a episódios recorrentes de vômito seguidos de escovação dental, frequentemente observados em indivíduos com bulimia nervosa. Para isso, foi utilizada uma abordagem integrativa combinando análise tridimensional por scanner intraoral e avaliação da composição mineral por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).

Os resultados demonstraram que o protocolo experimental foi capaz de induzir desgaste dental progressivo detectável por análise tridimensional, com aumento gradual da proporção de superfícies apresentando perda estrutural acima do limite operacional de detecção do scanner ao longo dos ciclos experimentais. Além disso, observou-se progressão do desgaste tanto em esmalte quanto em dentina radicular, com diferenças na variabilidade e no padrão de evolução temporal entre os dois tecidos.

Esses achados reforçam o potencial da análise tridimensional por escaneamento intraoral como ferramenta para monitoramento longitudinal de desgaste dental, especialmente em contextos clínicos nos quais a detecção precoce da perda estrutural é fundamental para prevenção e manejo da doença.

6.1 Desgaste dental associado a desafios ácido-abrasivos

O desgaste dental erosivo é atualmente reconhecido como um processo multifatorial envolvendo interações complexas entre fatores químicos, biológicos e comportamentais. A erosão dental pode ser compreendida como uma forma de biocorrosão caracterizada pela dissolução química do tecido mineralizado na ausência de participação bacteriana³.

No presente estudo, o protocolo experimental foi desenvolvido para reproduzir essa interação entre desafios químicos e mecânicos. A imersão em solução de ácido gástrico simulado foi utilizada para representar episódios de vômito, enquanto a escovação subsequente reproduziu o comportamento frequentemente observado em pacientes que realizam higiene oral imediatamente após esses episódios.

Estudos anteriores demonstraram que a abrasão mecânica pode acelerar significativamente a progressão da erosão dental quando aplicada sobre superfícies

previamente desmineralizadas^{4,5}. Nesse contexto, a camada superficial do esmalte parcialmente desmineralizado torna-se mecanicamente fragilizada e mais suscetível à remoção durante a escovação.

De forma semelhante, a dentina radicular também pode apresentar aumento de suscetibilidade ao desgaste após desafios ácido-abrasivos. Entretanto, esse processo pode ocorrer de maneira distinta em relação ao esmalte devido às características estruturais desse tecido. A dentina radicular apresenta menor grau de mineralização e maior conteúdo orgânico, além da presença de túbulos dentinários, fatores que podem influenciar a dinâmica da desmineralização ácida e da abrasão mecânica. No presente estudo, observou-se progressão do desgaste também na dentina radicular ao longo dos ciclos experimentais, com comportamento relativamente mais uniforme quando comparado ao esmalte, conforme evidenciado pela análise tridimensional realizada na figura 4.

Os resultados observados no presente estudo são consistentes com esse modelo fisiopatológico, uma vez que o desgaste médio aumentou progressivamente ao longo dos ciclos experimentais, especialmente nos tempos finais do protocolo. Esse comportamento cumulativo reflete a interação sinérgica entre desmineralização ácida e abrasão mecânica.

6.2 Desgaste em esmalte e dentina radicular

A comparação entre esmalte e dentina radicular mostrou que ambos os tecidos foram afetados pelo protocolo ácido-abrasivo, porém com diferenças no padrão de variabilidade dos resultados.

O esmalte apresentou maior dispersão dos valores de desgaste ao longo do experimento. Esse comportamento pode estar relacionado às características estruturais desse tecido, que possui alto grau de mineralização e organização prismática complexa. A dissolução inicial do esmalte pode ocorrer de forma heterogênea dependendo da orientação dos prismas e da presença de defeitos estruturais microscópicos.

Por outro lado, a dentina radicular apresentou evolução mais uniforme do desgaste ao longo do tempo. Esse resultado pode ser explicado pela composição e microestrutura da dentina, que contém maior proporção de matriz orgânica e menor grau de mineralização em comparação ao esmalte. Essa composição pode favorecer

maior homogeneidade na progressão do desgaste após a exposição a desafios ácido-abrasivos.

Esses achados estão em concordância com estudos prévios que demonstraram que a resposta dos tecidos dentários à erosão pode variar significativamente de acordo com sua composição e estrutura².

Além disso, a presença de dentina exposta é uma condição frequentemente observada em pacientes com desgaste erosivo avançado, especialmente em superfícies cervicais e radiculares. A avaliação da progressão do desgaste nesse tecido possui grande relevância clínica, pois a dentina apresenta maior sensibilidade e menor resistência à perda estrutural.

6.3 Monitoramento tridimensional do desgaste dental

Uma das principais contribuições do presente estudo foi a utilização de escaneamento intraoral tridimensional para monitoramento longitudinal do desgaste dental.

Tradicionalmente, a avaliação do desgaste erosivo tem sido realizada por métodos clínicos baseados em índices visuais, como o Basic Erosive Wear Examination (BEWE), proposto para avaliação clínica padronizada do desgaste erosivo dental⁶. Embora esses índices sejam úteis para avaliação clínica populacional, sua capacidade de detectar pequenas mudanças estruturais ao longo do tempo é limitada.

Nos últimos anos, tecnologias digitais têm sido exploradas como ferramentas promissoras para monitoramento do desgaste dental. Estudos recentes destacam que o uso de scanners intraorais e análise tridimensional pode representar uma abordagem promissora para o acompanhamento da progressão do desgaste dental⁷.

Além disso, métodos de análise tridimensional de superfície permitem quantificar alterações estruturais na escala de dezenas de micrômetros, possibilitando acompanhamento longitudinal do desgaste dental com maior sensibilidade⁸.

No presente estudo, a interpretação dos dados considerou o limite operacional de detecção do scanner utilizado (68 μm). Esse aspecto metodológico é particularmente relevante, pois permite diferenciar alterações estruturais detectáveis do ruído inerente ao método de medição.

Os resultados mostraram que, nos tempos iniciais do experimento, a maioria das medições permaneceu abaixo desse limite. No entanto, a proporção de

superfícies com desgaste detectável aumentou progressivamente ao longo dos ciclos experimentais, demonstrando a capacidade do método de acompanhar a evolução da perda estrutural.

6.4 Implicações clínicas

Os resultados do presente estudo possuem implicações clínicas importantes para o diagnóstico e manejo do desgaste dental associado a transtornos alimentares.

Pacientes com bulimia nervosa frequentemente apresentam episódios repetidos de exposição dos dentes ao ácido gástrico, seguidos de comportamentos de higiene oral imediatos. Essa combinação pode acelerar significativamente a progressão do desgaste dental.

Estudos demonstram que o cirurgião-dentista desempenha papel fundamental no diagnóstico precoce desses casos, uma vez que as manifestações orais podem preceder o diagnóstico médico do transtorno alimentar^{1,9}.

Nesse contexto, o uso de ferramentas digitais de monitoramento pode contribuir para identificação precoce da progressão do desgaste e para avaliação da eficácia de estratégias preventivas.

6.5 Limitações do estudo

Este estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

Primeiramente, trata-se de um estudo *in vitro*, o que implica ausência de fatores biológicos presentes na cavidade oral, como saliva, biofilme e variações fisiológicas do ambiente bucal.

Além disso, durante a execução experimental houve perda de algumas amostras, resultando em número reduzido de observações em determinados tempos experimentais. Esse fator limita a robustez estatística de algumas análises, particularmente na avaliação mineralógica.

Apesar dessas limitações, o modelo experimental permitiu reproduzir condições ácido-abrasivas relevantes e gerar informações importantes sobre a progressão do desgaste dental.

6.6 Perspectivas futuras

Estudos futuros podem expandir os achados do presente trabalho por meio de:

- I. modelos experimentais com maior número de amostras;
- II. avaliação de diferentes protocolos preventivos;
- III. estudos clínicos longitudinais utilizando escaneamento intraoral para monitoramento de desgaste dental.

A integração entre tecnologias digitais e métodos analíticos tradicionais representa uma abordagem promissora para aprimorar a compreensão dos mecanismos envolvidos no desgaste dental erosivo.

7 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste estudo experimental *in vitro*, pode-se concluir que o protocolo de desafios ácido-abrasivos cíclicos foi capaz de induzir desgaste dental progressivo, reproduzindo um modelo experimental compatível com condições de exposição repetida ao ácido gástrico associadas à escovação dental. A análise tridimensional baseada em escaneamento intraoral permitiu detectar e acompanhar longitudinalmente a progressão do desgaste dental ao longo dos ciclos experimentais, demonstrando aumento gradual da perda estrutural mensurável e da proporção de superfícies com valores de desgaste superiores ao limite operacional de detecção do scanner.

Tanto o esmalte quanto a dentina radicular apresentaram desgaste ao longo do experimento, com magnitude média semelhante entre os tecidos, embora diferenças tenham sido observadas no padrão de variabilidade e na progressão temporal da perda estrutural. A análise da composição mineral por espectroscopia de energia dispersiva de raios X indicou maior estabilidade da razão Ca/P no esmalte e maior variabilidade nos resultados obtidos para dentina radicular.

A integração entre análise tridimensional do desgaste e avaliação mineralógica permitiu caracterizar, de forma complementar, alterações estruturais e composicionais dos tecidos dentários submetidos a desafios ácido-abrasivos, indicando que o escaneamento intraoral associado à análise tridimensional constitui uma abordagem promissora para o monitoramento longitudinal do desgaste dental em modelos experimentais.

Dessa forma, os resultados do presente estudo indicam que a análise tridimensional por escaneamento intraoral representa uma ferramenta promissora para o monitoramento longitudinal do desgaste dental em modelos experimentais de desafio ácido-abrasivo, permitindo a detecção de alterações estruturais cumulativas em esmalte e dentina radicular.

REFERÊNCIAS*

1. Lo Russo L, Campisi G, Di Fede O, Di Liberto C, Panzarella V, Lo Muzio L. Oral manifestations of eating disorders: a critical review. *Oral Dis.* 2008; 14(6): 479-84.
2. Lussi A, Ganss C, editors. *Erosive tooth wear: from diagnosis to therapy*. 2nd rev and extended ed. Basel: Karger; 2014. (Monographs in Oral Science; vol. 25).
3. Ganss C, Lussi A, Schlueter N. Dental erosion as oral disease: insights in etiological factors and pathomechanisms, and current strategies for prevention and therapy. *Am J Dent.* 2012; 25(6): 351-64.
4. Attin T, Weiss K, Becker K, Buchalla W, Wiegand A. Impact of modified acidic soft drinks on enamel erosion. *Oral Dis.* 2005; 11(1): 7-12.
5. Wiegand A, Attin T. Influence of fluoride on the prevention of erosive lesions: a review. *Oral Health Prev Dent.* 2003; 1(4): 245-53.
6. Bartlett D, Ganss C, Lussi A. Basic erosive wear examination (BEWE): a new scoring system for scientific and clinical needs. *Clin Oral Investig.* 2008; 12(Suppl 1): S65-S8.
7. O'Toole S, Marro F, Loomans BAC, Mehta SB. Monitoring of erosive tooth wear: what to use and when to use it. *Br Dent J.* 2023; 234(6): 463-66.
8. Bas M, Waltenberger L, Kurzmann C, Heimel P, Rebay-Salisbury K, Kanz F. Quantification of dental macrowear using 3D occlusal surface topographic measurements in deciduous and permanent molars of children. *Am J Phys Anthropol.* 2021; 175(3): 701-11.
9. Nijakowski K, Jankowski J, Gruszczyński D, Surdacka A. Eating disorders and dental erosion: a systematic review. *J Clin Med.* 2023; 12(19): 6161.
10. Uhlen MM, Tveit AB, Stenhagen KR, Mulic A. Self-induced vomiting and dental erosion: a clinical study. *BMC Oral Health.* 2014; 14: 92.
11. Henry MACA. Diagnóstico e tratamento da doença do refluxo gastroesofágico. *ABCD Arq Bras Cir Dig.* 2014; 27(3): 210-15.
12. Gyawali CP, Yadlapati R, Fass R, Katzka D, Pandolfino J, Savarino E et al. Updates to the modern diagnosis of GERD: Lyon consensus 2.0. *Gut.* 2024; 73(2): 361-71.

* De acordo com o Guia de Trabalhos Acadêmicos da FOAr, adaptado das Normas Vancouver. Disponível no site da Biblioteca: <http://www.foar.unesp.br/Home/Biblioteca/guia-de-normalizacao-atualizado.pdf>

13. Lussi A, Schlueter N, Rakhmatullina E, Ganss C. Dental erosion: an overview with emphasis on chemical and histopathological aspects. *Caries Res.* 2011; 45(Suppl 1): 2-12.
14. Schlueter N, Hara A, Shellis RP, Ganss C. Methods for the measurement and characterization of erosion in enamel and dentine. *Caries Res.* 2011; 45(Suppl 1): 13-23.
15. Ciocan LT, Vasilescu VG, Răută SA, Pantea M, Pițuru SM, Imre M. Comparative analysis of four different intraoral scanners: an in vitro study. *Diagnostics.* 2024; 14(13): 1453.
16. Falihi MY, Majeed MA. Trueness and precision of eight intraoral scanners with different finishing line designs: a comparative in vitro study. *Eur J Dent.* 2023; 17(4): 1056-64.
17. Kühne C, Lohbauer U, Raith S, Reich S. Measurement of tooth wear by means of digital impressions: an in vitro evaluation of three intraoral scanning systems. *Appl Sci.* 2021; 11(11): 5161.
18. Kumar S, Keeling A, Osnes C, Bartlett D, O'Toole S. The sensitivity of digital intraoral scanners at measuring early erosive wear. *J Dent.* 2019; 81: 39-42.
19. Michou S, Vannahme C, Ekstrand KR, Benetti AR. Detecting early erosive tooth wear using an intraoral scanner system. *J Dent.* 2020; 100: 103445.
20. Vertuan M, Francisco EL, Francese MM, Silva JF, Magalhães AC. Effect of regenerating toothpastes on abrasion of eroded enamel and dentin: an in vitro study. *JADA Found Sci.* 2025; 4: 100053.
21. Greenspan DC. NovaMin and tooth sensitivity—an overview. *J Clin Dent.* 2010; 21(Spec Iss): 61-65.
22. Burwell A, Jennings D, Muscle D, Greenspan DC. NovaMin and dentin hypersensitivity—in vitro evidence of efficacy. *J Clin Dent.* 2010; 21(Spec Iss): 66-71.
23. LaTorre G, Greenspan DC. The role of ionic release from NovaMin (calcium sodium phosphosilicate) in tubule occlusion: an exploratory in vitro study using radio-labeled isotopes. *J Clin Dent.* 2010; 21(Spec Iss): 72-6.
24. Sharma N, Roy S, Kakar A, Greenspan DC, Scott R. A clinical study comparing oral formulations containing 7.5% calcium sodium phosphosilicate, 5% potassium nitrate, and 0.4% stannous fluoride for the management of dentin hypersensitivity. *J Clin Dent.* 2010; 21(3): 88-92.
25. Shah S, Shivakumar AT, Khot O, Patil C, Hosmani N. Efficacy of NovaMin- and Pro-Argin-containing desensitizing dentifrices on occlusion of dentinal tubules. *Dent Hypotheses.* 2017; 8(3): 104-09.

26. Canto FMT, Alexandria AK, Vieira TI, Justino IBS, Cabral LM, Silva RF et al. Comparative effect of calcium mesoporous silica versus calcium and/or fluoride products against dental erosion. *Braz Dent J*. 2020; 31(2): 164-70.
27. Behzadi S, Mohammadi Y, Rezaei-Soufi L, Farmany A. Occlusion effects of bioactive glass and hydroxyapatite on dentinal tubules: a systematic review. *Clin Oral Investig*. 2022; 26(10): 6061-78.
28. Delgado AHS, Sauro S, Lima AF, Loguercio AD, Della Bona A, Mazzoni A et al. RoBDEMAT: a risk of bias tool and guideline to support reporting of pre-clinical dental materials research. *J Dent*. 2022; 127: 104350.
29. Borges AB, Scaramucci T, Lippert F, Zero DT, Hara AT. Erosion protection by calcium lactate/sodium fluoride rinses under different salivary flows in vitro. *Caries Res*. 2014; 48(3): 193-199.
30. Wiegand A, Waldheim E, Sener B, Magalhães AC, Attin T. Comparison of the effects of TiF_4 and NaF solutions at pH 1.2 and 3.5 on enamel erosion in vitro. *Caries Res*. 2009; 43(4): 269-277.
31. Bologa E, Stoleriu S, Nica I, Tărăboantă I, Georgescu A, Matei RI, Andrian S. The effect of three desensitizing toothpastes on dentinal tubules occlusion and on dentin hardness. *Biomedicines*. 2023; 11(9): 2464.
32. Sauro S, Thompson I, Watson TF. Effects of common dental materials used in preventive or operative dentistry on dentin permeability and remineralization. *Oper Dent*. 2011; 36(2): 222-30.
33. Litkowski L, Greenspan DC. A clinical study of the effect of calcium sodium phosphosilicate on dentin hypersensitivity—proof of principle. *J Clin Dent*. 2010; 21(3): 77-81.
34. Soares R, De Noronha De Ataíde I, Fernandes M, Lambor R. Assessment of enamel remineralisation after treatment with four different remineralising agents: a scanning electron microscopy study. *J Clin Diagn Res*. 2017; 11(4): ZC136-ZC141.
35. Levrini L, Di Benedetto G, Raspanti M. Dental wear: a scanning electron microscope study. *Biomed Res Int*. 2014; 2014: 340425.
36. Shellis RP, Addy M. The interactions between attrition, abrasion and erosion in tooth wear. *Monogr Oral Sci*. 2014; 25: 32-45.
37. International Organization for Standardization. ISO/TS 11405: dentistry—testing of adhesion to tooth structure. Geneva: ISO; 2015 3rd ed.[acesso em 2025 fev 20]. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:11405:ed-3:v1:en>.
38. Cengiz S, Sarac S, Özcan M. Effects of simulated gastric juice on color stability, surface roughness and microhardness of laboratory-processed composites. *Dent Mater J*. 2014; 33(3): 343-48.

39. UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz. Centro de Microscopia Eletrônica (CME): Protocolos MET e MEV. Ilhéus: UESC [acesso em acesso em 2025 fev 20]. Disponível em:
https://www.uesc.br/centros/cme/arquivos/protocolos_met_mev.pdf

ANEXO A – DECLARAÇÃO DE ORIGEM DOS DENTES BOVINOS

Declaração de Origem dos Dentes Bovinos

Zanchetta Indústria de Alimentos Ltda, inscrito no CNPJ 33.920.401/0001-19, por este instrumento informa aos órgãos de ética e pesquisa em animais que os 18 dentes bovinos, abate do dia 12/11/2025 (lotes 01, 02, 03 e 04), foram comercializados por Nelson Queiroz 01536909840, inscrito no CNPJ 33.837.015/0001-68, para teste “in vitro”, para a pesquisa denominada: “Efeito de um dentifício remineralizante sobre os tecidos dentários submetidos a desafios cíclicos de ácido gástrico: um estudo in vitro”.

Os dentes pertencem a bovinos da raça Nelore, com cerca de 3 anos de idade e 250 kg de peso limpo, tratados dentro dos rígidos padrões de qualidade, e rastreamento sob fiscalização do Ministério da Agricultura – SIF 1758.

Atenciosamente,


José Mauricio Soares Pardo
Gerente Comercial

Bauru, 09 janeiro de 2026.

Zanchetta Indústria de Alimentos Ltda
Jardim Mendonça | Bauru/SP
Brasil

Av. Rosa Malandrino Mondelli, 10-45
CEP 17026-803
55 14 2106-1833

Autorizo a reprodução deste trabalho

(Direitos de publicação reservado ao autor)

Araraquara, 02 de abril de 2026.

Luiza Altamirano