PRISCILLA PESSIN COPPO

**Novo método para o estudo de desgaste por atrição (deslizamento alternado)
em esmalte bovino, em função da carga normal e da lubrificação:
redução do desgaste com gel lubrificante oral**

São Paulo
2015

PRISCILLA PESSIN COPPO

**Novo método para o estudo de desgaste por atrição (deslizamento alternado)
em esmalte bovino, em função da carga normal e da lubrificação:
redução do desgaste com gel lubrificante oral**

Versão Original

Tese apresentada à Faculdade de
Odontologia da Universidade de São Paulo
para obter o título de Doutor pelo Programa
de Pós-Graduação em Odontologia/
Biomateriais e Biologia Oral

Orientador: Prof. Dr. Rafael Yagüe Ballester

São Paulo

2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-Publicação
Serviço de Documentação Odontológica
Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo

Coppo, Priscilla Pessin.

Novo método para o estudo de desgaste por atrição (deslizamento alternado) em esmalte bovino, em função da carga normal e da lubrificação: redução do desgaste com gel lubrificante oral / Priscilla Pessin Coppo; orientador Rafael Yagüe Ballester. -- São Paulo, 2015.

125 p. : il. : fig., tab. ; 30 cm.

Tese (Doutorado) -- Programa de Pós-Graduação em Odontologia -- Área de concentração: Biomateriais e Biologia Oral -- Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo.

Versão original.

1. Abrasão dentária. 2. Esmalte dentário. 3. Microscopia Eletrônica de Varredura – Materiais Dentário. 4. Lubrificação – Materiais Dentários. I. Ballester, Rafael Yagüe. II. Título.

Coppo PP. Novo método para o estudo de desgaste por atrição (deslizamento alternado) em esmalte bovino, em função da carga normal e da lubrificação: redução do desgaste com gel lubrificante oral. Tese apresentada à Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Odontologia pelo programa de Pós-Graduação em Biomateriais e Biologia Oral.

Aprovado em: / /2015

Banca Examinadora

Prof(a). Dr(a). _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof(a). Dr(a). _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof(a). Dr(a). _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof(a). Dr(a). _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof(a). Dr(a). _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

Agradecer tem a ver com viver uma experiência boa, alegre. Um esforço contra tudo que pode nos entristecer; resistência. Parece que, numa caminhada como esta, somos orientados pela insistência. Tudo que somos é oriundo de um esforço para continuar a ser e, ainda, esta força é o que nos move para nos tornarmos cada vez melhores. E, assim, vivemos dificuldades diárias, alegrias e tristezas, em busca de uma maior potência para nós mesmos, em busca de aperfeiçoamento, o que nos estimula a continuar lutando. Lutas que sempre travaremos. Isto é o que vale a pena. É o que torna a vida feliz. Porque a dificuldade é parte do caminho, e, lutar contra ela, também. Por tudo, agradeço:

à minha família, Maria, Alfredo, Rodrigo e Pedro, que, conviveu com minha ausência, ao mesmo tempo que sempre apoiou incondicionalmente e respeitou minhas decisões. O amor, o companheirismo, uma palavra de carinho e, até mesmo, o silêncio num abraço são bens inestimáveis;

a todos os meus amigos, principalmente Bruna Carminati, Bruno Dalvi, Bruno Machado, Mariana Coppo, Mirella Novaes, Nathalya Coppo e Samantha Maciel, fundamentais para a contribuição mútua que resulta na construção do que cada um de nós é hoje. Amizade que surgiu na infância e adolescência e atravessa as décadas. Sempre estaremos juntos, mesmo quando estivermos separados fisicamente, guardados em nosso lado de dentro;

ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Yagüe Ballester, que possibilitou e apoiou a realização desta parceria entre a odontologia e a engenharia. Durante todo este período, valorizei todo o conhecimento científico e acadêmico transmitido e, também, aqueles que foram transmitidos indiretamente, como a paciência, a perseverança, a dedicação e a minúcia. Seu conjunto de ensinamentos é capaz de formar seus orientandos ao mesmo tempo que transforma profissionais e pessoas, o que reflete o importante valor de um professor em nossas vidas;

a todos os professores do departamento de Biomateriais e Biologia Oral da FOU SP, Profa. Dra. Josete Barbosa Cruz Meira, Prof. Dr. Igor Studart Medeiros, Prof. Dr. Paulo Francisco César, Prof. Dr. Paulo Eduardo Capel Cardoso, Prof. Dr. Walter Gomes Miranda Junior, Prof. Dr. Fernando Neves Nogueira, Prof. Dr. Leonardo Elloy Rodrigues Filho, Prof. Dr. Antonio Muench, Prof. Dr. Roberto Ruggiero Braga, Prof. Victor Elias Arana Chavez, Profa. Dra. Alyne Simões Gonçalves, Prof. Dr. Carlos Eduardo Francci, Profa. Dra. Rosa Helena Miranda Grande, pelo ótimo convívio, pelas aulas e conversas;

aos colegas da pós-graduação da FOU SP, Alexander Nishida, Ana Carolina Freitas, Ana Carolina Romero, Bruno Lopes, Carina Tanaka, Erick de Lima, Fabrícia Araújo, Livia, Lucas Hian, Marina Roscoe, Ranulfo Miranda e Thayse Guimarães, que sempre me receberam muito bem e com quem compartilhei parte das alegrias e dificuldades desta jornada;

ao Antônio Lascale, por ser tão habilidoso e sempre muito solícito em ajudar;

às secretárias da FOU SP, Rosa Cristina e Elidamar, dedicadas, dispostas a ajudar, e, além de tudo, extremamente carinhosas;

à Dona Fran, por sempre me receber tão bem em todas as chegadas à São Paulo;

a todos os colegas do departamento de engenharia mecânica da UFES, principalmente, Leandro Entringer, Lionel Limol, Nathan Strey e Roberto Balarini, que sempre se prontificaram a me ajudar nesta difícil caminhada que escolhi, de disciplinas e estudos longe de minha “zona de conforto” do conhecimento. Em especial, agradeço a Mateus Aguiar, que esteve comigo durante dias, noites, fins de semana, feriados, meses, até conseguirmos concretizar todos os ensaios;

a todos os professores e funcionários do departamento de Engenharia Mecânica da UFES, em especial ao Prof. Dr. Flávio José, que contribuiu com seus conhecimentos na melhoria da metodologia deste estudo;

ao Prof. Dr. Cherlio Scandian, do departamento de Engenharia Mecânica da UFES, que me recebeu em suas disciplinas e aceitou a árdua tarefa de ensinar a linguagem tribológica a uma dentista. Exemplo diário de dedicação, inteligência, conhecimento, comprometimento e seriedade, e, além de tudo isto, exemplo de um professor extraordinário. Esteve a meu lado durante todo este período, com paciência e dedicação, e abraçou esta pesquisa como sua. Meus agradecimentos a ele sempre serão insuficientes para expressar a enorme gratidão que sinto pela oportunidade a mim concedida e pela transformação em mim causada;

ao CNPq, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Coppo P. Novo método para o estudo de desgaste por atrição (deslizamento alternado) em esmalte bovino, em função da carga normal e da lubrificação: redução do desgaste com gel lubrificante oral [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2015. Versão Original.

O esmalte dental é o tecido mineralizado mais duro do corpo humano; apesar disto, seu desgaste é um problema muito comum. Este pode estar associado aos processos de envelhecimento, ou ainda, ser encontrado em indivíduos jovens, como consequência de atividades parafuncionais, por exemplo, atrição dental. Este tipo de dano pode resultar em prejuízo da função mastigatória e em diminuição da qualidade de vida. Por isto, o desgaste do esmalte dental tem sido objeto de muitos estudos, embora poucos tenham utilizado conceitos tribológicos. Não foi encontrado nenhum estudo que explorasse o desgaste de esmalte e seus micromecanismos oriundos do deslizamento alternado de incisivo contra incisivo, configuração que mais se aproxima do tribossistema real de atrição. O presente estudo tem por objeto investigar o desgaste e seus mecanismos em pares deslizantes de esmalte incisal (configuração pino-plano), selecionados por seus similares valores de dureza e de tenacidade à fratura, submetidos a diferentes cargas normais e lubrificações do meio. Incisivos bovinos foram ensaiados em deslizamento alternado sob duas cargas normais (8 N e 16 N) e quatro modos de lubrificação: saliva natural; saliva artificial; gel lubrificante oral (Oralbalance®, Biotène); e grupo controle sem lubrificação (seco). Durante os ensaios, foram levantadas as curvas de atrito. O volume desgastado e a rugosidade da superfície foram mensurados via perfilometria 3D. Os micromecanismos de desgaste foram analisados ao microscópio eletrônico de varredura. O aumento da carga normal aplicada resultou em aumento do volume de desgaste para todas as condições. Comparando-se ao grupo sem lubrificação, as salivas (natural e artificial) não reduziram o desgaste, mas a lubrificação com o gel foi efetiva para reduzir tanto o volume de esmalte desgastado como o coeficiente de atrito. A relação entre o valor do parâmetro de rugosidade Sq e o coeficiente de atrito não foi linear, nem entre a rugosidade Sq e o coeficiente de desgaste, para todas as condições. Os micromecanismos de desgaste encontrados foram, em ordem crescente de severidade: desgaste da região interprismática (8 N - gel);

propagação de trincas interprismáticas (8 N - seco); reações triboquímicas associadas à ação mecânica (8 N - saliva natural e artificial; 16 N - gel; 16 N - saliva natural e artificial); e deslocamento (16 N - seco).

Palavras-chave: Desgaste dental. Esmalte. Atrição. Desgaste por deslizamento alternado. Carga normal. Lubrificação. Atrito. Mecanismos de desgaste.

ABSTRACT

Coppo P. New method to study the wear by attrition (reciprocating sliding) in enamel, depending on the normal load and lubrication: reduction in wear with gel oral lubricant [thesis]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2015. Versão Original.

Enamel is the hardest mineralized tissue in the human body; despite that, the enamel wear is a very common problem. The wear damage can be related to aging processes or also be found in young people as a result of parafunctional activities, for example, dental attrition. This type of damage can result in loss of masticatory function and decreased quality of life. Therefore, the wear of the enamel has been the subject of many studies, although few have used tribological concepts. The wear mechanisms of reciprocating sliding pairs from incisor against incisor have not been reported in the literature, this configuration is the one that is closest to the real tribosystem of attrition. The present study aims to investigate the wear behavior and the related mechanisms in reciprocating sliding pairs of incisal enamel (pin-on-flat configuration), selected for their similar hardness and fracture toughness values, with different applied normal loads and lubrication conditions. Bovine incisors were tested in reciprocating sliding with different applied normal loads (8 N and 16 N) and four lubrication conditions: natural saliva; artificial saliva; oral gel lubricant (Oralbalance®, Biotène); and control group (dry). During tests, the friction curves were recorded. The volume loss and the surface roughness S_q were investigated by 3D profilometry. Wear mechanisms were analyzed by scanning electron microscope. The increase of the normal load resulted in an increased volume loss for all conditions. Comparing to the group without lubrication, the saliva (natural and artificial) did not reduce the volume loss, but the lubricant gel was effective to reduce both the volume loss and the coefficient of friction. The relationship between the value of the roughness S_q and the friction coefficient was not linear, nor between the roughness S_q and the wear coefficient for all conditions. In increasing order of severity, the micromechanisms of wear were: wear at the interrod enamel (8 N - gel); crack propagation in the interrod enamel (8 N - dry); tribochemical reactions associated with mechanical wear (8 N – natural saliva and artificial saliva; 16 N - gel; 16 N - natural saliva and artificial saliva); and flake-like wear (16 N - dry).

Keywords: Tooth wear. Enamel. Attrition. Reciprocating sliding wear. Normal load. Lubrication. Friction. Wear mechanism.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 – Esquema dos elementos constituintes do tribossistema (A) - Adaptado de Zum Gahr³³. Componentes do tribossistema identificados na atrição dental em caninos (B): corpo - canino inferior; contra-corpo – canino superior; elemento interfacial – saliva; meio – ar. Acervo pessoal 28
- Figura 2.2 – Força de atrito F , necessária para causar o movimento de rolamento ou de deslizamento em diferentes corpos sob cargas aplicadas W (A) – Adaptado de Hutchings¹⁹. Áreas aparente e real no contato estático e em deslizamento (B) – Adaptado de Zum Gahr³³ 29
- Figura 2.3 – Esquema dos tipos de desgaste: deslizamento, abrasão, reações triboquímicas, fadiga de contato – Adaptado de Zum Gahr³³; erosão – Adaptado de Hutchings¹⁹; e cavitação 32
- Figura 2.4 – Taxa de desgaste e resistência elétrica no contato obtidos em um ensaio de desgaste por deslizamento de um pino de latão contra um disco duro de *stellite*, em função da carga normal. Note a transição abrupta da taxa de desgaste, simultânea com a modificação da resistência no contato. Adaptado de Hutchings¹⁹ 34
- Figura 2.5 – Esquema da estrutura do tribossistema com suas variáveis operacionais e resultados. Adaptado da apresentação do Instituto Nacional de Engenharia de Superfícies, realizado em 2014 36
- Figura 2.6 - Orientação dos prismas do esmalte (1) e dos cristais de hidroxiapatita no interior dos prismas nas três faces de um bloco de esmalte (2) – Adaptado de Ferraris e Muñoz² 40
- Figura 2.7 – Representação esquemática de algumas estruturas secundárias do esmalte, Adaptado de Ferraris e Muñoz² 41
- Figura 2.8 – Esquema de trincas induzidas pelo atrito. Força tangencial ou de atrito (F) e carga normal (W). Adaptado de Kato²¹ 42

Figura 2.9 – Esquema do desgaste oriundo da propagação de trincas verticais; pressão de contato $p(x)$ e coeficiente de atrito em função da pressão de contato $\mu p(x)$. Adaptado de Kato ²¹	43
Figura 4.1 – Moldes de silicone para confecção das bases dos: (A) corpo e (B) contra-corpo	51
Figura 4.2 – Corpo: (A) localização dos cortes (linhas tracejadas) para eliminação da raiz, próximo à junção amelocementária e para planificação da região incisal; (B) após os cortes; (C) após seu embutimento em resina; e (D) detalhe da vista incisal do esmalte, com destaque para a região prevista para a trilha de desgaste	52
Figura 4.3 – Contra-corpo: (A) localização dos cortes e tamanhos; (B) vista vestibular do palito formado pelos cortes e (C) vista proximal; (D) vista vestibular após embutimento em resina; (E) as linhas tracejadas brancas indicam os cortes nas faces vestibular e lingual (em ângulo reto) e a amarela indica o corte para planificação; e (F) demarcação da área plana incisal do contra-corpo (retângulo em preto) que entrará em contato com o corpo para a formação da trilha de desgaste	52
Figura 4.4 – (A) Vista superior do dispositivo com o contra-corpo posicionado no suporte para cortes a 45° nas faces (B) vestibular e (C) lingual; (D) vista lateral do dispositivo com o contra-corpo posicionado no suporte para corte a 90° e (E) vista superior.....	53
Figura 4.5 – Localização das indentações para medida da dureza: (A) no corpo; (B) para o contra-corpo	55
Figura 4.6 – (A) Corpo e contra-corpo fixados ao microtribômetro CETR®; (B) vista proximal e (C) vista vestibular	58
Figura 4.7 – Grupos de pares dentais por carga aplicada e seus subgrupos de lubrificação	59

- Figura 5.1 - Volume removido médio dos corpos de esmalte bovino em diferentes condições de carga normal e lubrificação. Letras iguais indicam semelhança estatística pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)..... 63
- Figura 5.2 – Coeficiente de desgaste dimensional k médio para as diferentes condições de carga normal e lubrificação..... 66
- Figura 5.3 – Coeficiente de atrito em função do tempo (s) para um par ensaiado com carga normal de 8 N em cada uma das condições de lubrificação: (A) seco; (B) saliva artificial; (C) saliva natural; (D) gel. Em cinza: nuvem de pontos dos valores individuais; em preto: curva da média variável, obtida a cada 10 s..... 68
- Figura 5.4 – Coeficiente de atrito em função do tempo (s) para um par ensaiado com carga normal de 16 N em cada uma das condições de lubrificação: (A) seco; (B) saliva artificial; (C) saliva natural; (D) gel. Em cinza: nuvem de pontos dos valores individuais; em preto: curva da média variável, obtida a cada 10 s..... 69
- Figura 5.5 – Coeficiente de atrito (μ) em função do coeficiente de desgaste dimensional (k) (A) e em escala logarítmica (B) do esmalte nas diferentes condições de carga normal e de lubrificação..... 70
- Figura 5.6 – Parâmetro de rugosidade S_q médio dos corpos de esmalte bovino em diferentes condições de carga normal e lubrificação 71
- Figura 5.7 - Distinção entre a trilha de desgaste e a área além da trilha de um desgaste moderado da superfície do esmalte do corpo vista ao MEV - ensaio interrompido, 8 N - gel 73
- Figura 5.8 – Esquema de um bloco de esmalte – adaptado de Ferraris e Muñoz² – e imagem de MEV evidenciando as estruturas histomorfológicas encontradas em uma trilha de desgaste do corpo formada num plano de corte oblíquo ao eixo longitudinal de orientação dos prismas - ensaio interrompido, 8 N - gel..... 73

- Figura 5.9 – Esquema de um bloco de esmalte – adaptado de Ferraris e Muñoz² – e imagem de MEV evidenciando as estruturas histomorfológicas encontradas em uma trilha de desgaste do corpo formada num plano de corte transversal ao eixo longitudinal de orientação dos prismas - ensaio interrompido, 8 N - gel 74
- Figura 5.10 – Estrias formadas sobre a trilha de desgaste no corpo, transversais à direção do deslizamento. No detalhe (que corresponde a uma região em que a camada superficial se desprende) pode ser observado que a largura entre as estrias comporta cerca de 3 prismas - ensaio completo, 16 N - seco 74
- Figura 5.11 – Esquema (I) e imagens em MEV (II) que ilustram o motivo da diferença entre as larguras das trilhas dos corpos obtidas em duas condições de ensaio: em (II-A) houve menor volume desgastado e trilha mais estreita – ensaio completo, 8 N – saliva natural; em (II-B) houve desgaste mais severo e trilha mais larga, que ocupa toda a largura da imagem - ensaio completo, 16 N – saliva natural. As regiões pontilhadas em I-A e I-B representam a altura do contra-corpo desgastada durante o ensaio. Note que a largura da face em contato do contra-corpo aumenta com o desgaste 75
- Figura 5.12 – Área da trilha de desgaste do corpo observada ao MEV em que se evidenciam os contornos dos prismas devido ao desgaste preferencial da região interprismática - ensaio interrompido, 8 N - gel 76
- Figura 5.13 – Esquema ilustrativo das possibilidades de falta de paralelismo das superfícies após a montagem dos pares na máquina de ensaio. Na vista vestibular, nota-se uma inclinação do contra-corpo no sentido próximo-proximal (mésio-distal); na vista proximal, embora o eixo vertical do contra-corpo esteja alinhado, há uma inclinação do mesmo no vestíbulo-lingual. As setas indicam a direção e sentidos do movimento 77
- Figura 5.14 – Área da trilha de desgaste do corpo observada ao MEV em que se evidenciam duas regiões: na área de menor pressão Hertziana o desgaste ocorreu predominantemente na região interprismática - ensaio interrompido, 8 N - seco 78
- Figura 5.15 – Esquema (A) e imagem em MEV (B) que ilustram o motivo da diferença de conformidade entre o plano do corpo e o plano do

contra-corpo devido à convexidade presente na superfície do contra-corpo. A largura da região desgastada na superfície do contra-corpo (delimitada pelas setas brancas) é inferior à largura da superfície preparada para entrar em contato (seta amarela). A imagem (B) corresponde ao contra-corpo apresentado nas imagens A da Figura 5.29, na página 95 79

Figura 5.16 – Imagens das áreas centrais das trilhas de desgaste ao MEV obtidas no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes da trilha 81

Figura 5.17 – Imagem de parte da região central da trilha de desgaste ao MEV – ensaio interrompido 81

Figura 5.18 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo. As setas (amarelas) apontam as camadas que se destacam da superfície, origem de *debris* 82

Figura 5.19 – Imagem de parte da trilha de desgaste ao MEV – ensaio completo. As setas indicam *debris* que riscaram a superfície; o movimento dos *debris* ocorreu na direção do movimento. A trinca que aparece na imagem é um artefato da técnica microscópica, originada após a metalização..... 83

Figura 5.20 - Imagens das áreas centrais da superfície do contra-corpo ao MEV no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes do desgaste 84

Figura 5.21 – Imagens das áreas centrais das trilhas de desgaste ao MEV obtidas no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. A trinca presente na imagem I-A e em I-B são artefatos de técnica. As setas indicam as áreas limítrofes da trilha .. 86

Figura 5.22 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo..... 87

- Figura 5.23 – Imagens de áreas da superfície do contra-corpo ao MEV no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes do desgaste. No centro da imagem II-B é possível notar uma área em que houve destacamento da superfície e lateralmente, as trincas responsáveis pelo destacamento de fragmentos dessa camada 88
- Figura 5.24 – Imagens das áreas centrais das trilhas de desgaste ao MEV obtidas no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes da trilha 89
- Figura 5.25 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo; nota-se a região em que houve destacamento e exposição de prismas de esmalte 90
- Figura 5.26 – Imagens de áreas centrais da superfície do contra-corpo ao MEV no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes do desgaste 91
- Figura 5.27 – Imagens das áreas centrais das trilhas de desgaste ao MEV obtidas no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento (uma explicação da figura II-A está na Figura 5.14 na página 78). As setas indicam as áreas limítrofes da trilha. A elipse sinaliza uma das áreas em que houve destacamento de camada de prismas, ampliada na Figura 5.28..... 92
- Figura 5.28 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo..... 94
- Figura 5.29 – Imagens de áreas centrais da superfície do contra-corpo ao MEV no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas brancas indicam as áreas limítrofes do desgaste. As cabeças de setas (amarelas) indicam o limite da área plana do contra-corpo. No centro da imagem II-A (asterisco vermelho) é possível notar uma área de interseção de trincas e início de destacamento de *debris*. Nota-se, também, a propagação de trincas pela região interprismática (área marcada com a elipse), ampliada na imagem da Figura 5.30 95

- Figura 5.30 – Imagens em MEV de áreas de propagação de trincas nas regiões limítrofes do desgaste (setas). As trincas seguem uma direção preferencial através região interprismática (note que a orientação dos prismas e da região interprismática pode ser identificada na área desgastada, marcada com um sinal de mais). O asterisco (vermelho) sinaliza uma área de interseção de trincas e início de destacamento de *debris*. Aumentos de 3.000x (A) e de 5.000x (B)..... 96
- Figura 5.31 – Imagens de áreas centrais da trilha sobre o corpo (A) e da superfície do contra-corpo (B) ao MEV, em menor (I) e em maior (II) aumento. As cabeças de setas (amarelas) indicam o limite da área plana do contra-corpo..... 97
- Figura 5.32 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo. Na imagem em MEV, a seta aponta uma área com desgaste preferencial na região interprismática; o asterisco indica *debris* que se destacarão da superfície; limitado pela elipse é possível notar *debris* deformados que se destacaram da superfície..... 98
- Figura 5.33 – Imagens de áreas centrais da trilha sobre o corpo (A) e da superfície do contra-corpo (B) ao MEV, em menor (I) e em maior (II) aumento. Na imagem I-A, as setas indicam as áreas limítrofes da trilha; logo abaixo aparece a junção amelodentinária (que, neste caso se encontrava próxima da trilha, a qual se alargou durante o ensaio) como uma trinca. Na imagem I-B, as cabeças de setas indicam o limite da área plana do contra-corpo, já muito próximas da junção amelodentinária (que aparece como uma trinca na horizontal), devido ao elevado volume desgastado no contra-corpo; as setas apontam os limites das fraturas nas bordas proximais do contra-corpo 99
- Figura 5.34 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo..... 100
- Figura 5.35 – Imagens de áreas centrais da trilha sobre o corpo (A) e da superfície do contra-corpo (B) ao MEV, em menor (I) e em maior (II) aumento. A área do canto superior esquerdo da imagem I-B está ampliada na imagem II-B..... 101
- Figura 5.36 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo..... 102

- Figura 5.37 – Imagens de áreas centrais da trilha sobre o corpo (A) e da superfície do contra-corpo (B) ao MEV, em menor (I) e em maior (II) aumento. A elipse sinaliza uma das áreas em que houve deslocamento..... 104
- Figura 5.38 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo..... 105
- Figura 5.39 – Imagem em MEV da trilha de desgaste no corpo. Em menor aumento (A) é possível distinguir quatro áreas, em faixas horizontais, de cima para baixo: uma região estriada e mais escura, com deslocamentos; logo abaixo, uma região estriada recoberta densamente por *debris*, de aspecto esbranquiçado; em seguida, uma área sem estrias e com abundantes *debris* deformados (sobre a qual está marcado o retângulo); e a quarta área, de uma superfície fora da trilha mas coberta parcialmente por *debris*. As setas indicam a região limítrofe da trilha. (B): ampliação do quadro da imagem (A). (C): ampliação do quadro da imagem (B) 106
- Figura 5.40 – Esquema crescente de severidade do micromecanismo de desgaste para as condições de carga normal aplicada e de lubrificação 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Medidas de microdureza Vickers no corpo lubrificado com gel	57
Tabela 4.2 - Parâmetros do ensaio de deslizamento	58
Tabela 5.1 - Médias de volume removido para a interação dos fatores “carga normal” e “lubrificação”. Os valores identificados com as mesmas letras são estatisticamente semelhantes entre si	62
Tabela 5.2 - Médias de volume removido para o fator “lubrificação”, apenas sob carga de 8 N. Os valores identificados com as mesmas letras são estatisticamente semelhantes entre si	64
Tabela 5.3 - Valores de coeficiente de desgaste adimensional (K) e coeficiente de desgaste dimensional (k) dos corpos de esmalte nas diferentes condições de carga normal e de lubrificação	65
Tabela 5.4 – Relação entre as severidades dos desgastes (K) dos corpos nas várias condições de carga normal e de lubrificação	66
Tabela 5.5 - Valores de coeficiente de atrito (μ) encontrados para o esmalte nas diferentes condições de carga normal e de lubrificação – valores médios obtidos da média variável de três pares ensaiados em cada condição. Os valores identificados com as mesmas letras são estatisticamente semelhantes entre si	67

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

α	Constante
μ	Coeficiente de atrito
μ_d	Coeficiente de atrito dinâmico
μm	Micrometro
μ_s	Coeficiente de atrito estático
a	Medida da metade da diagonal da indentação
D	Distância deslizada
DP	Desvio padrão
F	Força de atrito
gf	Grama-força
GPa	Gigapascal
H	Dureza da superfície menos dura
l	comprimento da trinca a partir do vértice da indentação
Hz	Hertz
HV	Dureza Vickers
K	Coeficiente adimensional de desgaste
k	Coeficiente dimensional de desgaste
K_{IC}	Tenacidade à fratura
m	Metro
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mm^3	Milímetro cúbico
mm^3/m	Milímetro cúbico dividido por metro
$mm^3(N\ m^{-1})$	Milímetro cúbico dividido por Newton vezes metro
$MPa.m^{1/2}$	Megapascal vezes raiz quadrada de metro
m/s	Metro dividido por segundo
mm/s	Milímetro dividido por segundo
N	Newton
nm	Nanometro
N/m^2	Newton dividido por metro quadrado

P	Carga aplicada durante o ensaio microdureza Vickers
Q	Taxa de desgaste
s	Segundo
S _c	Severidade do contato
S _q	Desvio padrão da distribuição das alturas de picos e vales da superfície
V	Volume de desgaste
W	Carga normal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1	ABORDAGEM TRIBOLÓGICA DA ATRIÇÃO DENTAL	28
2.1.1	Atrito	29
2.1.2	Desgaste	31
2.1.3	Caráter sistêmico do atrito e do desgaste	35
2.1.4	Lubrificação	37
2.2	ESMALTE DENTAL HUMANO	38
2.3	DESGASTE DE MATERIAIS FRÁGEIS	42
2.3.1	Tribologia dos cerâmicos	42
2.3.2	Tribologia do esmalte	45
3	OBJETIVO GERAL	49
3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	49
4	MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1	PREPARAÇÃO DOS ESPÉCIMES PARA ENSAIO	50
4.2	SELEÇÃO DOS CORPOS E CONTRA-CORPOS	54
4.3	LUBRIFICANTES	55
4.4	ENSAIO DE DESLIZAMENTO ALTERNADO	57
4.5	CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA POR PENETRAÇÃO	60
4.6	ANÁLISE AO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	61
4.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1	VOLUME REMOVIDO E COEFICIENTES DE DESGASTE	62
5.2	COEFICIENTE DE ATRITO	67
5.3	DESVIO QUADRÁTICO MÉDIO S_q	71
5.4	MICROMECHANISMOS DE DESGASTE	72
5.4.1	Aspectos gerais das trilhas de desgaste	72
5.4.2	Carga normal 8 N, gel	79
5.4.3	Carga normal 8 N, saliva artificial	84
5.4.4	Carga normal 8 N, saliva natural	88
5.4.5	Carga normal 8 N, seco	92

5.4.6 Carga normal 16 N, gel	96
5.4.7 Carga normal 16 N, saliva artificial	98
5.4.8 Carga normal 16 N, saliva natural.....	100
5.4.9 Carga normal 16 N, seco	103
5.5 DISCUSSÃO GERAL.....	107
5.6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	111
5.7 ESTUDOS FUTUROS	113
6 CONCLUSÃO.....	114
7 REFERÊNCIAS	115
ANEXOS.....	122

1 INTRODUÇÃO

O esmalte dental é um tecido altamente mineralizado^{1, 2} e de elevada dureza³, ainda assim, seu desgaste é muito prevalente, mesmo em adolescentes e adultos jovens^{4, 5}; este desgaste pode resultar em prejuízo da função mastigatória e em diminuição da qualidade de vida⁶.

É razoável esperar que o comportamento tribológico do esmalte dependa da sua microestrutura e das propriedades mecânicas da camada exposta ao desgaste. Como a microestrutura do esmalte não é uniforme, suas propriedades mecânicas de dureza e tenacidade à fratura variam em função da profundidade da camada em um mesmo dente^{3, 7, 8} e, desta forma, sua resposta ao desgaste também pode variar. Ainda, o esmalte apresenta anisotropia⁸⁻¹⁰ para algumas propriedades mecânicas como, por exemplo, para o módulo de elasticidade.

Geralmente, o clínico utiliza um dos seguintes nomes para se referir à etiologia principal das lesões com origem associada ao desgaste: abrasão, corrosão, abfração ou atrição. Ainda não foi estabelecido um protocolo preventivo ou restaurador para estas lesões, pois a sua origem não se explica por mecanismos simples e incontestáveis. Muitas vezes, esta classificação da etiologia do desgaste pode parecer de pouca utilidade, pois, na prática, dificilmente conseguem-se identificar casos em que se possa isolar um ou outro modo, já que eles costumam acontecer simultânea ou alternadamente, o complica ainda mais o diagnóstico¹¹⁻¹⁴.

A atrição dental é um processo natural e inevitável decorrente do deslizamento de dente contra dente. Quando o contato é funcional, o desgaste é pouco perceptível. Mas, quando existem hábitos parafuncionais (como o bruxismo), o desgaste pode causar danos importantes. Nos movimentos parafuncionais há aumento da frequência e/ou da força de contato aplicada sobre os dentes. Já foi reportado que a máxima força mastigatória na região de incisivos é cerca de 120 - 190 N¹⁵ e que indivíduos com atividades parafuncionais podem aplicar uma força média 50% superior a esta enquanto rangem os dentes¹⁶. Estima-se que cerca de 60% da população adulta possua o hábito de ranger os dentes¹⁷, muitos destes necessitam de algum tratamento odontológico restaurador ou interceptor.

Nos casos patológicos, a atrição pode ser identificada clinicamente pelos seus sinais. Dentre eles, os dentes antagonistas apresentam facetas planas de

contato, brilhantes e coincidentes, ao invés de pontos de contato que conservem sua convexidade original. Muitas vezes, estas facetas podem ser encontradas nas bordas incisais de dentes incisivos e de caninos, superfícies que, em condições de normalidade, pouco entram em contato durante os movimentos mastigatórios^{14, 18} e, quando o fazem, contatam sob pouca força.

Um dos possíveis meios práticos de diminuir o desgaste é pela adição de lubrificantes. Seu papel eficaz pode ocorrer com o afastamento completo ou parcial das asperezas presentes nas superfícies em contato, redução da área real de contato e diminuição do coeficiente de atrito¹⁹. Por outro lado, reações químicas (triboquímicas) podem ser induzidas na presença de um lubrificante durante o movimento relativo e influenciar no desgaste, o que é particularmente importante no desgaste de materiais cerâmicos²⁰⁻²⁵. A saliva presente na cavidade oral e a própria película adquirida depositada sobre o esmalte podem atuar como lubrificantes naturais²⁶⁻²⁸, mas, como lubrificantes, nota-se, clinicamente, que são pouco efetivos para impedir o desgaste significativo do esmalte em indivíduos com hábitos parafuncionais (atrição).

Pouco se sabe sobre os mecanismos de desgaste por atrição característicos do esmalte dental seco ou lubrificado e sobre o efeito sinérgico que pode existir entre os lubrificantes e o carregamento normal quando duas superfícies de esmalte incisal deslizam uma contra a outra. Não foram encontrados estudos com esta configuração tribológica, a qual se aproxima daquela encontrada na região de contato de bordas incisais durante a atrição.

Diante do exposto, este estudo se propôs a investigar o desgaste do esmalte em ensaio de deslizamento alternado. Foram utilizados pares conformes (superfícies deslizantes planas) de esmalte incisal bovino. As superfícies de esmalte submetidas ao desgaste foram caracterizadas quanto a seus valores de microdureza Vickers e de tenacidade à fratura. Foram correlacionados os micromecanismos de desgaste e as propriedades do tribossistema às variações de carga normal aplicada e lubrificação do meio (sem lubrificação, saliva artificial, natural ou gel lubrificante oral).

2 REVISÃO DA LITERATURA

O desgaste dental é a perda superficial de material dos tecidos duros causado por fatores mecânicos e/ou químicos, excluindo-se cáries e traumas. É considerado um problema prevalente em todos os grupos etários^{4, 5, 29}. Em levantamento realizado em 1010 indivíduos de 18 - 30 anos foi detectado desgaste em esmalte em todos os participantes; 76,9% destes indivíduos apresentaram pelo menos uma superfície de dentina exposta. As superfícies mais comumente desgastadas e com maior grau de desgaste, de acordo com a escala utilizada, foram as incisais de incisivos e de caninos³⁰.

O desgaste dental aumenta com a idade devido ao uso funcional, mas ainda há informações insuficientes para explicar quando o aumento do desgaste é resultado de fatores específicos, como dieta ou hábitos parafuncionais, ou reflete os processos de envelhecimento³¹. A estrutura, a constituição mineral e orgânica do esmalte e da dentina e as modificações de conteúdo destes tecidos com o envelhecimento podem alterar importantes propriedades mecânicas, como a dureza e a tenacidade à fratura, e influenciar no desgaste^{8, 10}.

Se não controlado, o desgaste dental pode resultar em prejuízo da função mastigatória e em diminuição da qualidade de vida⁶. Com o aumento da expectativa de vida da população, a diminuição dos índices de cárie e a manutenção dos dentes naturais por períodos mais longos, o estudo do desgaste dental se tornou uma área de interesse crescente, tanto para uma abordagem restauradora (como e com que materiais restaurar os tecidos dentais perdidos), quanto preventiva (quais são os mecanismos de desgaste e como evitar ou interromper seu progresso)³².

O desgaste dental pode apresentar variações de etiologia, severidade, localização e apresentação clínica. Tradicionalmente em odontologia, os modos de desgaste podem ser divididos em quatro categorias^{11, 14, 18}:

- **atrição** – é uma forma de desgaste decorrente do deslizamento de dente contra dente, funcional ou parafuncional (como o bruxismo), que usualmente ocorre nas superfícies oclusais e incisais. Se manifesta, clinicamente, através de grandes desgastes e dentes com facetas polidas e brilhantes. O paciente pode apresentar hipertrofia do masseter, desconforto, fadiga ou dor nos músculos da mastigação. A

atrição severa pode resultar em exposição dentinária e perda de dimensão vertical;

- abrasão – é um desgaste resultante da interação de partículas abrasivas com a superfície dental, impulsionadas ou não pelos movimentos mastigatórios. Sua manifestação clínica depende das características físicas e propriedades mecânicas do agente abrasivo, da superfície dental que está se desgastando e do tipo de movimento das partículas. Pode ocorrer, por exemplo, quando há alta carga aplicada na escovação horizontal realizada com dentífrico abrasivo;
- erosão – é um desgaste resultante da dissolução dos tecidos mineralizados pela ação de substâncias ácidas endógenas ou exógenas, tais como ácidos gástricos ou alimentos, respectivamente. Pode atingir o esmalte, deixando-o mais delgado e brilhante, ou a dentina, deixando-a com áreas côncavas nas pontas de cúspides e bordos incisais. As restaurações podem parecer projetadas das superfícies. Para definir melhor este fenômeno, Grippo et al.¹³ sugeriram que o termo erosão fosse substituído por corrosão, que denota o desgaste das superfícies dos dentes ou restaurações causado pela dissolução química; e
- abfração – é um desgaste influenciado pela concentração de tensões quando o carregamento é aplicado em um local distante de onde ocorre o desgaste. O nome abfração tem sido muito criticado por não refletir corretamente o tipo de desgaste em questão. A etimologia da palavra inglesa *abfraction* indica que ocorre uma fratura à distância do ponto de aplicação da carga: estas fraturas constituiriam a base do mecanismo deste tipo de desgaste. Porém, a maior parte do volume desgastado neste tipo de lesão costuma ser de dentina, na qual dificilmente foram observadas trincas ou fraturas oriundas de cargas oclusais. Hoje em dia, as pesquisas sugerem que haja maior solubilidade em ácidos nesta região, potencializada pela ação de tensões concentradas. Não se sabe ao certo, ainda, se a concentração de tensões deve ser concomitante ou apenas preceder a ação do ácido. Sugere-se que a denominação deste tipo de desgaste fizesse

menção da interação mecânica e química para descrever mais adequadamente o fenômeno.

Esses modos de desgaste dificilmente ocorrem isoladamente e sua ação alternada pode modificar o padrão das lesões continuamente. Muitas vezes, a subdivisão dos modos de desgaste é puramente teórica, na prática dificilmente consegue-se isolar um ou outro modo. Por exemplo, as superfícies incisais de dentes de dois indivíduos que realizam atividade parafuncional noturna podem ter aspectos distintos, pois os dentes estão expostos a ciclos variados em diferentes meios bucais. A ação contínua ou alternada de modos de desgaste por atrição noturna, escovação dental com pastas abrasivas, meios ácidos corrosivos oriundos da dieta, escovação abrasiva nos dentes que sofreram corrosão e desgaste abrasivo durante a alimentação pode modificar a aparência das lesões diariamente¹⁴.

A identificação da etiologia seria essencial para o tratamento, mas, em muitos casos, a combinação dos fatores etiológicos complica o diagnóstico e modifica a aparência ou o padrão de desgaste dental. Devido à possível ação alternada dos modos de desgaste e à complexidade das variações do meio bucal¹², os modos de desgaste citados, que já são classificados desde 1778, ainda possuem mecanismos de desgaste incertos¹³ (o termo mecanismo refere-se à identificação da forma como a matéria é perdida durante o desgaste).

Na atrição, as variações individuais bucais, as grandes cargas aplicadas durante os movimentos parafuncionais e a mudança constante das características das superfícies desgastadas resultam em um sistema de grande complexidade, tanto para a inclusão de indivíduos em estudos clínicos, quanto para a reprodução laboratorial, o que dificulta a identificação do mecanismo de desgaste. A abordagem metodológica preconizada pela tribologia pode ser aplicada às categorias odontológicas do desgaste, em especial à atrição, a fim de determinar, principalmente, a maneira como a matéria é perdida.

2.1 ABORDAGEM TRIBOLÓGICA DA ATRIÇÃO DENTAL

Tribologia é a ciência que estuda a interação das superfícies em movimento relativo e seus domínios de atrito, desgaste e lubrificação¹⁹.

Para estudar do desgaste sob o método tribológico, deve-se avaliar não só a superfície que está sofrendo desgaste, mas toda a estrutura do sistema tribológico, ou tribossistema. A estrutura do tribossistema é determinada pelos seus elementos componentes, pelas propriedades dos seus elementos e pela interação entre eles. Usualmente, o tribossistema consiste de 4 elementos: corpo; contra-corpo; elemento interfacial; e meio³³, apresentados na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Esquema dos elementos constituintes do tribossistema (A) - Adaptado de Zum Gahr³³. Componentes do tribossistema identificados na atrição dental em caninos (B): corpo - canino inferior; contra-corpo - canino superior; elemento interfacial - saliva; meio - ar. Acervo pessoal

A ação destes elementos ou a interação entre eles pode variar enormemente em função do tipo de movimento das superfícies, do estado físico do contra-corpo, de seu ângulo de ação e da presença ou ausência de um lubrificante, por exemplo³⁴. Em geral, as funções biomecânicas orais também resultam em sistemas tribológicos distintos e que se alternam continuamente.

2.1.1 Atrito

A força de atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo ao se mover sobre outro. Esta definição engloba duas importantes classes de movimento relativo: deslizamento e rolamento (imagem A da Figura 2.2). Durante o movimento, a força de atrito é exercida entre os corpos através da área real de contato^{19, 33} (imagem B da Figura 2.2).

Figura 2.2 – Força de atrito F , necessária para causar o movimento de rolamento ou de deslizamento em diferentes corpos sob cargas aplicadas W (A) – Adaptado de Hutchings¹⁹. Áreas aparente e real no contato estático e em deslizamento (B) – Adaptado de Zum Gahr³³

A relação entre duas forças atuantes no tribossistema, a força de atrito (F) e a carga normal (W), é conhecida como coeficiente de atrito (equação 1), identificado pelo símbolo μ ¹⁹:

$$\mu = F/W \quad (1)$$

μ : coeficiente de atrito;
 F : Força de atrito (N);
 W : Carga normal (N).

O coeficiente de atrito oriundo de uma força tangencial aplicada para iniciar o movimento relativo entre dois corpos denomina-se coeficiente de atrito estático - μ_s .

Denomina-se coeficiente de atrito dinâmico (μ_d) aquele obtido quando os corpos já estão em movimento¹⁹.

Para algumas condições de deslizamento (determinados pares de materiais em condições fixas de ensaio), μ pode ser praticamente constante. Estas observações levaram à formulação das denominadas leis do atrito, que são as seguintes¹⁹:

- a força de atrito é proporcional à carga normal;
- a força de atrito é independente da área aparente de contato; e
- a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

Estas leis, aplicáveis a alguns pares deslizantes, não podem ser aplicadas de maneira universal. Por exemplo, a primeira e a segunda lei não se aplicam aos pares deslizantes de materiais poliméricos. A terceira lei é ainda um pouco menos fundamentada que as duas primeiras¹⁹.

É uma observação comum que a força necessária para iniciar o movimento seja usualmente maior que a necessária para manter o movimento, então, o μ_s é maior que o μ_d . Mas, uma vez que o deslizamento esteja estabelecido, μ_d pode ser independente da velocidade deslizada ou, ainda, pode diminuir com o aumento da velocidade¹⁹.

Uma das principais razões da não universalidade destas leis é considerar a não dissipação de energia da força de atrito. Seu valor, seja em condições estáticas ou dinâmicas, pode apresentar variação, pois a energia associada ao deslizamento pode ser dissipada através de³⁵:

- calor gerado entre as superfícies;
- formação ou ruptura de ligações adesivas;
- reações de ordem ou desordem na superfície;
- deformação elástica;
- deformação plástica;
- geração de ondas sonoras ou vibrações;
- fratura das asperidades;
- criação de defeitos ou transformação de fase;
- reações químicas oriundas do deslizamento (triborreação);
- perdas na viscosidade de um lubrificante (se existir); e

- compressão e redistribuição dos *debris* na interface.

A maneira pela qual a energia dissipada é particionada depende dos atributos específicos de cada tribossistema. Logo, o atrito não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas uma propriedade sistêmica, ou do tribossistema^{33, 36}.

Como o número de fatores que afetam o atrito é grande, torna-se necessário identificar um conjunto de variáveis aplicáveis a cada caso particular para selecionar o melhor método de ensaio ou de simulação. Mais importante do que conhecer o valor do atrito para um par de materiais, é entender a maneira como cada corpo em contato e o ambiente contribuem para o valor do atrito³⁶.

2.1.2 Desgaste

Desgaste é a perda progressiva de material devido ao movimento relativo entre superfícies em contato ou entre uma superfície e uma substância. Esta definição não exclui os fenômenos de dano de superfície sem remoção de massa como, por exemplo, os fenômenos de desgaste acompanhados de oxidação ou aqueles nos quais as partículas de desgaste ficam aderidas à superfície sólida ou, ainda, aqueles nos quais há apenas deformação da superfície³⁷.

Existem diversas classificações de desgaste, como: de acordo com a configuração de contato (deslizamento, rolamento, impacto, *fretting* e lama abrasiva)³⁸; com o estado de deformações da superfície (deformação elástica, deformação plástica, formação e crescimento de trincas)³⁸; e com o modo de perda de matéria superficial^{19, 33}, por exemplo. Neste último modo, o desgaste pode ser classificado por (Figura 2.3):

- deslizamento – tipo de desgaste gerado pelo escorregamento de uma superfície sólida ao longo de outra superfície³⁹;
- abrasivo – perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície, ao longo da qual se movem³⁷. Se o tamanho do dano causado pelo evento abrasivo

for menor que uma dezena de micrometros, denomina-se desgaste microabrasivo⁴⁰;

- erosivo – perda progressiva de material original de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre esta e um fluido, um fluido com partículas sólidas ou partículas sólidas³⁹;
- cavitação – perda progressiva de material devido à exposição contínua à cavitação³⁹;
- fadiga de contato – desgaste de uma superfície sólida decorrente do contato por rolamento entre superfícies³⁹;
- reações triboquímicas – formação de um filme interfacial como resultado de interações químicas entre os elementos do tribossistema, inicializado pela ação tribológica³³.

Figura 2.3 – Esquema dos tipos de desgaste: deslizamento, abrasão, reações triboquímicas, fadiga de contato – Adaptado de Zum Gahr³³; erosão – Adaptado de Hutchings¹⁹; e cavitação

A ocorrência de um tipo de desgaste não exclui a presença de outro. Sob algumas condições de deslizamento, os *debris* oriundos do desgaste, por exemplo, podem permanecer interpostos entre as superfícies e iniciar um desgaste abrasivo. Isto quer dizer que, tanto para a odontologia quanto para a tribologia, as distinções entre os tipos de desgaste não são rígidas^{19, 33}.

O desgaste pode ser entendido pela análise teórica de Archard, inicialmente formulada para o desgaste por deslizamento¹⁹ (equação 2):

$$Q = \frac{V}{D} = \frac{KW}{H} \quad (2)$$

Q : taxa de desgaste (mm^3/m);
 V : volume de desgaste (mm^3);
 D : distância deslizada (m);
 K : coeficiente adimensional de desgaste;
 W : carga normal (N);
 H : dureza da superfície menos dura (N/m^2).

Esta equação (2) relaciona o volume desgastado por unidade de distância deslizada, Q , à quantidade macroscópica W , carga normal, e à H , a dureza da superfície menos dura. A constante K , coeficiente de desgaste, é adimensional e sempre menor que a unidade¹⁹.

O coeficiente K pode ser interpretado de várias formas. Uma das interpretações define K em termos de probabilidade de produção de partículas de desgaste a partir da interação entre cada aspereza em contato. K também reflete o número de ciclos de deformação necessários para que cada aspereza se torne um fragmento de material removido por fadiga. Alternativamente, K pode ser relacionado com o tamanho da partícula de desgaste produzido por cada aspereza em contato. Assim, K é útil para fornecer uma medida de comparação de severidade de desgaste em diferentes sistemas. Entretanto, para muitas aplicações tribológicas, a quantidade K/H é mais útil, identificada pelo símbolo k e denominada de coeficiente de desgaste dimensional ($\text{mm}^3(\text{N m})^{-1}$). O valor de k é particularmente útil para se comparar taxas de desgaste entre diferentes classes de materiais ou entre materiais submetidos a cargas aplicadas distintas¹⁹.

A interpretação da equação (2) indica que, se K é uma constante de um dado tribossistema, então o volume de material removido por desgaste deve ser proporcional à distância deslizada e, se a carga normal aplicada W varia, então a taxa de desgaste Q deve variar proporcionalmente. Para muitos tribossistemas existe esta proporcionalidade, porém, esta pode se perder em algumas variações de carga normal aplicada. Isto evidencia que transições das respostas ao desgaste

podem estar presentes, isto é, que as propriedades do tribossistema podem variar com o tempo de ensaio, com a velocidade ou mesmo com as variações de carga normal aplicada. Desta forma, o desgaste pode se classificar em regimes, a priori, denominados de moderado e severo¹⁹⁻²¹.

Em pares metálicos deslizantes, por exemplo, o regime de desgaste moderado pode ser caracterizado por baixas taxas de desgaste, superfícies lisas, curva de atrito mais estável e micromecanismos de desgaste dominados pela remoção de pequenas partículas óxidas (de 0,1 μm ou menos), quimicamente diferentes do corpo do material devido às reações com o meio. No regime severo, há alta taxa de desgaste (geralmente maior que no desgaste moderado em até três ordens de grandeza), que pode ser acompanhada de alta rugosidade superficial, curva de atrito variável e micromecanismos de desgaste dominados por severa deformação plástica. Os *debris* são grandes e não diferem quimicamente do corpo do material^{19, 33}. Um gráfico de um tribossistema que apresenta os dois regimes de desgaste pode ser visualizado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Taxa de desgaste e resistência elétrica no contato obtidos em um ensaio de desgaste por deslizamento de um pino de latão contra um disco duro de *stellite*, em função da carga normal. Note a transição abrupta da taxa de desgaste, simultânea com a modificação da resistência no contato. Adaptado de Hutchings¹⁹

Os materiais cerâmicos diferem dos metais quanto à natureza de suas ligações interatômicas (iono-covalentes), com limitada capacidade de deformação plástica na temperatura ambiente. De modo geral, os cerâmicos são materiais de alta dureza, alto módulo de elasticidade e baixa tenacidade à fratura, quando comparados aos metais. Portanto, os cerâmicos estão mais propensos à fratura frágil quando submetidos às tensões. Além disto, eles são mais sensíveis ao meio ambiente. Cerâmicas óxidas têm aumento da taxa de crescimento de trinca na presença de água. Em cerâmicas não óxidas, reações químicas superficiais, como oxidação, são enormemente favorecidas pelo deslizamento^{19, 41}.

No regime de desgaste moderado de pares cerâmicos deslizantes, há predomínio de reações triboquímicas e deformação plástica. Os *debris* são finos e podem ser quimicamente diferentes do material, por exemplo, partículas óxidas e resultantes de processos de hidratação. As taxas de desgaste são baixas e as superfícies apresentam baixa rugosidade. No regime severo, há predomínio de micromecanismos dominados por fratura frágil, com formação de *debris* angulosos, que não diferem quimicamente do substrato. As taxas de desgaste são mais elevadas e as superfícies são mais rugosas¹⁹⁻²⁴.

2.1.3 Caráter sistêmico do atrito e do desgaste

O desgaste e o atrito não podem ser classificados como propriedades intrínsecas dos materiais. Eles devem ser considerados fenômenos sistêmicos, dependentes de vários parâmetros e da variação de cada um deles^{19, 20, 22}. A estrutura do tribossistema, as variáveis operacionais e os resultados (perdas e saídas úteis) estão esquematizados na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Esquema da estrutura do tribossistema com suas variáveis operacionais e resultados. Adaptado da apresentação do Instituto Nacional de Engenharia de Superfícies, realizado em 2014

Como atrito e desgaste são quantidades sistêmicas, precisa-se entender que nem sempre um alto valor de coeficiente de atrito será relacionado a uma alta taxa de desgaste, pois nem toda a interação entre as superfícies irá, obrigatoriamente, resultar em formação de *debris*. Da mesma forma, dois materiais que exibem o mesmo coeficiente de atrito podem exibir diferentes taxas de desgaste se diferirem quanto à forma como a energia é particionada em cada um dos materiais^{19, 33, 36}. Adicionalmente, ao modificar apenas uma das variáveis do tribossistema, pode-se mudar totalmente as respostas de atrito e desgaste obtidas.

Para analisar efetivamente o desgaste, o ideal seria estudar o tribossistema real, por exemplo, o desgaste dos dentes na boca dos indivíduos. Porém, para muitas aplicações, este estudo torna-se inviável, técnica, econômica e, neste caso, biologicamente. Então, são realizados ensaios para simular o tribossistema real. Sabe-se que há fidelidade no modelo utilizado no laboratório quando os ensaios laboratoriais reproduzem o micromecanismo de desgaste encontrado no tribossistema real³³.

Diferentes arranjos experimentais são usados para estudar o desgaste. As investigações laboratoriais do desgaste são conduzidas tanto para descobrir o

mecanismo pelo qual a matéria é perdida quanto para simular as aplicações práticas e fornecer informações úteis de taxa de desgaste e coeficiente de atrito. Para ambas funções, o controle e mensurações das variáveis que podem influenciar o desgaste são muito importantes para que os resultados dos ensaios sejam úteis tanto para a simulação de uma aplicação prática quanto para propostas científicas maiores¹⁹.

2.1.4 Lubrificação

O coeficiente de atrito em sistemas deslizantes de metais, da maioria dos cerâmicos e de alguns polímeros é raramente menor que 0,5. Em muitos casos, é maior. Tais valores de μ seriam intoleráveis para diversas aplicações, pois produziriam grandes forças de atrito e, conseqüentemente, perdas enormes de energia. Para a maioria das situações práticas, lubrificantes (materiais de menor resistência ao cisalhamento que as superfícies em contato) são empregados para reduzir tais forças entre as superfícies¹⁹.

O lubrificante pode afastar completa ou parcialmente as asperezas, reduzir a área real de contato entre estas superfícies, diminuir a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito. Existem 4 tipos de lubrificação¹⁹:

- hidrodinâmica – as superfícies são separadas por um filme fluido que é usualmente mais espesso que as alturas das asperezas das duas superfícies. A pressão hidrostática no filme causa pequena distorção elástica nas superfícies que podem ser tratadas como rígidas;
- elastohidrodinâmica – a pressão local é alta e a espessura do filme é baixa, tanto que o pico de algumas asperezas pode entrar em contato e a deformação elástica das superfícies não pode ser negligenciada;
- limítrofe – as superfícies são separadas por filmes moleculares adsorvidos, os quais minimizam o contato entre as asperezas e, conseqüentemente, a formação de junções (para materiais metálicos); e
- sólida – há interposição de um filme interfacial sólido de baixa resistência ao cisalhamento entre as superfícies.

Durante a atrição, teoricamente, é possível que os regimes de lubrificação limítrofe e elastohidrodinâmica estejam presentes²⁷. A película salivar adquirida, naturalmente depositada sobre o esmalte, pode atuar como um lubrificante entre as superfícies em contato²⁶. Mesmo que a saliva possua um papel lubrificante, parece não haver uma simples correlação entre a presença de saliva e a redução do desgaste do esmalte⁴², assim como entre a viscosidade da saliva e sua performance lubrificante²⁷. Sugere-se que a alteração da saliva com a idade, com o uso de medicamentos antidepressivos, com disfunções das glândulas salivares ou com o tratamento radioterápico, possam ser fatores que levam ao desgaste dental excessivo^{27, 43}.

Um indivíduo com alterações salivares pode precisar de substitutos de saliva que melhorem a capacidade de lubrificação da mucosa oral e interdental, devolvendo-lhe maior conforto^{27, 43}. Muitas destas substâncias podem apresentar uma desvantagem aparente que é a indução da desmineralização do esmalte e da dentina, principalmente as que apresentam o pH em torno de 5,5, verificado *in vitro*^{44, 45}. Contrariamente a este fato indesejado de potencial desmineralização, foi relatado o efeito desejável de redução do desgaste no esmalte em meio de reduzido pH⁴⁶⁻⁴⁸, o que pode ser atribuído ao filme que se forma durante o desgaste e permanece depositado sobre a superfície desgastada, interposto entre as superfícies em contato.

Repositores e substitutos salivares são amplamente indicados para proporcionar alívio de irritações na mucosa oral em pacientes com redução de fluxo salivar, mas ainda não se sabe se a presença do gel Oralbalance® (Biotène), interposto entre os dentes durante o movimento relativo em deslizamento, pode atuar como um lubrificante que colabore para a redução do desgaste.

2.2 ESMALTE DENTAL HUMANO

O esmalte dental é o tecido biológico mais mineralizado do organismo. Quimicamente, é constituído de cerca de 97% (em peso) de conteúdo inorgânico, representado por cristais de fosfato de cálcio sob a forma de hidroxiapatita, principalmente, e por outros componentes, como carbonatos, sulfatos, potássio,

magnésio, ferro e flúor. Cerca de 1% de sua composição é de material orgânico, de natureza proteica, com escassos carboidratos e lipídeos, e 2% é de água¹.

Histologicamente, uma divisão conceitual pode ser feita para classificar sua constituição: unidade estrutural básica, o prisma do esmalte; e unidades estruturais secundárias, que se originam da anterior².

Os prismas (Figura 2.6, na qual são apresentadas medidas que são similares para esmalte humano e bovino⁴⁹) são estruturas de formato aproximadamente cilíndrico, as quais seguem um trajeto tortuoso que vai da junção amelodentinária até a superfície externa do esmalte. Neles, os cristais alongados estão dispostos longitudinalmente ao cilindro e praticamente justapostos uns aos outros (a exata orientação no sentido longitudinal apenas se mantém na região central do eixo), com mínimos espaços preenchidos por proteínas¹.

Numa secção transversal do esmalte, perpendicular ao longo eixo dos prismas (e condicionada por ácido), é possível identificar uma estrutura em formato semelhante ao de olhos de fechadura, justapostos. Em cada olho de fechadura, a região central de contorno mais circular corresponde ao prisma².

Na periferia de cada região circular do prisma, bem como na região mais alongada do olho de fechadura (antigamente chamada de cauda do prisma) os cristais se dispõem gradativamente mais inclinados em relação ao longo eixo do prisma: toda esta região (em que os cristais se dispõem inclinados) é chamada de “região interprismática”. No encontro das regiões interprismáticas relacionadas a cada prisma é possível identificar uma linha fina, de cerca de 50 a 100 nm de espessura (o que a torna praticamente invisível ao MEV). Nesta linha, as orientações entre os cristais de prismas e/ou de regiões interprismáticas adjacentes se tornam mais discrepantes; entre os cristais desalinhados ficam espaços, preenchidos por proteínas, como a “bainhalina”¹.

Embora os prismas apresentem um grande eixo longitudinal, em algumas regiões do esmalte, cortado longitudinalmente aos prismas, também são observadas estriações transversais. Como diariamente são formados 4 µm de esmalte, essas estriações poderiam se relacionar com o ritmo circadiano na produção do esmalte pelos ameloblastos. Por outro lado, existe uma outra possibilidade de serem observadas estrias transversais, que seriam de outra origem: pelo fato de regiões interprismáticas estarem separadas entre si por aproximadamente 4 µm de prisma, o

esmalte cortado obliquamente aos prismas poderia aparecer com estriações transversais correspondentes a regiões interprismáticas².

Figura 2.6 - Orientação dos prismas do esmalte (1) e dos cristais de hidroxiapatita no interior dos prismas nas três faces de um bloco de esmalte (2) – Adaptado de Ferraris e Muñoz²

As unidades estruturais secundárias são definidas como estruturas que se originam a partir das unidades estruturais primárias como resultado de vários mecanismos: o diferente grau de mineralização; a mudança no percurso dos prismas; e a interrelação entre o esmalte e a dentina subjacente ou na periferia com o meio externo. Os tufo de Linderer surgem pelo primeiro mecanismo; as bandas de Hunter-Schreger, o esmalte nodoso e as estrias de Retzius surgem pelo segundo mecanismo; e, entre as que os fazem pelo terceiro, a junção amelodentinária, os fusos de esmalte, as periquimácias, as linhas de imbricação de Pickerill e as fissuras do esmalte². Algumas destas estruturas estão representadas na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Representação esquemática de algumas estruturas secundárias do esmalte, Adaptado de Ferraris e Muñoz²

O conhecimento estrutural deste tecido é necessário para entender como ele se comporta frente aos estímulos mecânicos. Seus valores de módulo de elasticidade, dureza e tenacidade à fratura giram em torno de 90 GPa, 4,5 GPa e 1,1 MPa.m^{1/2}, respectivamente^{8, 10, 50-52}. As medidas destas propriedades mecânicas podem sofrer alteração de valor em função da anisotropia do esmalte, relacionada à direção dos prismas. Assim, os valores das propriedades de dureza e de módulo de elasticidade são, em média, um pouco maiores (5 e 97 GPa, respectivamente) quando o carregamento é feito longitudinal ao longo eixo dos prismas⁸⁻¹⁰; com carregamento semelhante, o valor da tenacidade à fratura encontrado é menor (cerca de 0,7 MPa.m^{1/2}) e as trincas, formadas entre prismas, são mais longas^{7, 9, 53}.

Uma outra fonte de variação das medidas das propriedades mecânicas em um mesmo dente refere-se à composição não uniforme do esmalte, que varia em função da distância à dentina⁵⁴ – as camadas mais superficiais apresentam, por exemplo, maior módulo de elasticidade (85 a 100 GPa)^{50, 55}, maior dureza (4 a 5 GPa)^{8, 10, 50, 56} e menor tenacidade à fratura (0,7 MPa.m^{1/2})^{7, 9, 57} que as camadas mais próximas à junção amelodentinária. Essas alterações podem ser atribuídas às mudanças de orientação dos prismas ao longo da camada e à presença de unidades estruturais secundárias que modificam o grau de mineralização do tecido⁸.

O esmalte pode ser considerado um material cerâmico, dadas suas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, dureza e tenacidade à fratura) e seu teor mineral^{10, 50, 51, 58}.

2.3 DESGASTE DE MATERIAIS FRÁGEIS

2.3.1 Tribologia dos cerâmicos

Os cerâmicos são materiais de alta dureza e baixa tenacidade à fratura, quando comparado aos metais. Em razão de sua fragilidade, vários tipos de trincas são induzidas pelo atrito em torno da zona de contato, denominadas de trincas Hertzianas, laterais, mediana e radiais; sob as trilhas de desgaste não há presença de grandes deformações plásticas, como observado em metais. Normalmente, a superfície de um cerâmico também possui defeitos superficiais (trincas verticais) oriundos do polimento. Dependendo do valor da pressão no ponto de contato, as partículas de desgaste são formadas pela propagação de algumas destas trincas²¹ (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Esquema de trincas induzidas pelo atrito. Força tangencial ou de atrito (F) e carga normal (W). Adaptado de Kato²¹

Se a pressão no contato for pequena, ou em ciclos iniciais do deslizamento, os *debris* podem ser oriundos de mecanismos de microsulcamento (*micro ploughing*) e de formação de pequenas partículas (*powder-like*); o sulcamento causa uma deformação plástica na superfície, com *debris* geralmente pequenos ou, até mesmo, pode não formar *debris*. A rugosidade resultante do desgaste pode se aproximar do valor inicial de rugosidade da superfície polida. Nestas condições, o regime de desgaste é dito moderado^{21, 22, 24}.

No desgaste severo, os *debris* formados possuem a forma de placas (*flake-like wear*) e a rugosidade é alta. Tal mecanismo pode-se dar pela propagação de trincas laterais ou de verticais. Quando o contato é pontual (partícula ou indentador pontiagudo), há formação de uma pequena zona plástica, seguida pela nucleação e fechamento de uma trinca mediana com concomitante nucleação e propagação de trinca lateral (modelo de Evans e Marshall⁵⁹). Defeitos superficiais geram trincas verticais que podem se propagar em função do compromisso entre o atrito e a pressão no contato^{21-24, 60} (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Esquema do desgaste oriundo da propagação de trincas verticais; pressão de contato $p(x)$ e coeficiente de atrito em função da pressão de contato $\mu p(x)$. Adaptado de Kato²¹

Existem várias equações que podem relacionar as importantes variáveis que atuam no desgaste de materiais frágeis. Semelhante à equação 2 (apresentada na página 33), a equação 3 fornece o cálculo da taxa de desgaste para estes materiais, porém, neste caso, o volume de material perdido é proveniente da propagação de uma trinca lateral¹⁹:

$$Q = \alpha \frac{W^{5/4}}{K_{IC}^{3/4} \cdot H^{1/2}} \quad (3)$$

Q : taxa de desgaste (mm³/m);
 α : constante;
 W : carga normal (N);
 K_{IC} : tenacidade à fratura (MPa.m^{1/2});
 H : dureza da superfície menos dura (N/m²).

Nessa equação, nota-se a presença de uma importante propriedade do material: a tenacidade à fratura (K_{IC}), que mede a resistência à propagação de trincas⁶⁰. Agora, a resistência ao desgaste não se faz somente com o aumento da dureza do material, mas, sim, pelo aumento do produto da tenacidade à fratura pela dureza¹⁹.

Algumas outras interpretações importantes podem ser extraídas da equação 3. Uma delas é que o expoente da carga normal (W) é maior que a unidade. Isto significa que a taxa de desgaste aumenta de maneira não linear com o aumento da carga aplicada, explicada pela formação de *debris* grandes oriundos da interseção de trincas. Este modelo também indica que há uma dependência maior da tenacidade à fratura que da dureza na resistência ao desgaste, evidenciado pelos seus respectivos expoentes. Finalmente, sugere que o desgaste por fratura frágil irá ocorrer somente quando a carga crítica para a propagação de trincas for excedida. Isto é, sob baixa carga, a fratura pode ser suprimida pelo sulcamento. Sob alta carga, ocorre fratura frágil e alta taxa de desgaste¹⁹, conforme já apresentado.

Fenômenos químicos também influenciam o desgaste dos cerâmicos, ao contrário da observação comum de que estes materiais são inertes ao meio. A ocorrência de reações químicas catalisadas pelo movimento relativo pode ser identificada de várias maneiras, com indução de crescimento de trincas que elevam as taxas de desgaste, modificações na composição química da superfície e rugosidade, que diminuem o desgaste, ou pela dissolução do material no líquido do meio^{21, 24}. O exato momento de início deste mecanismo triboquímico pode ser difícil precisar, mas, há uma tendência de que o coeficiente de atrito e o desgaste mudem juntamente com a mudança química oriunda das reações²¹.

Os *debris* provenientes do desgaste de cerâmicos não constituem uma camada de proteção contra o desgaste, seja ele mecânico (fratura) ou triboquímico. Quando permanecem sob a trilha, podem ser reduzidos a partículas menores por fratura, pela ação contínua da carga aplicada e do movimento. Quando a umidade ou outras condições químicas induzem a uma aglomeração dos *debris*, estes podem ser rolados e retirados da trilha, mesmo se estiverem formando um filme superficial compactado. Estes filmes usualmente não são duros, mas podem influenciar o desgaste ao redistribuir as tensões no contato e ao dissipar a energia proveniente das forças de cisalhamento²⁴.

2.3.2 Tribologia do esmalte

Materiais frágeis, como cerâmicos e esmalte dental, apresentam similaridades em seus micromecanismos de desgaste, dominados pela propagação de trincas. Em deslizamento alternado de cúspide de esmalte contra plano de esmalte humano, lubrificado com água destilada, foram observadas trincas sub-superficiais em regiões em que o contato estava sob deformação elástica^{51, 58}. As trincas apresentavam uma direção preferencial entre os cristais de hidroxiapatita, paralelamente à superfície e perpendiculares à orientação dos cristais. Os *debris* permaneceram aderidos, sob a trilha de desgaste. Em algumas regiões, os *debris* foram removidos, atribuído à ação contínua do gotejamento do lubrificante⁵⁸.

Similaridades dos mecanismos de desgaste também foram relatadas entre esmalte e cerâmicos em ensaio de nanoesclerometria linear^{50, 61}.

Um indentador de pequeno raio de curvatura (20 a 50 nm) sulca o esmalte, sob baixa carga normal, resposta semelhante à encontrada para o vidro. Sob alta carga normal, o esmalte apresentou propagação de trinca através da fase orgânica, com deflexão entre os cristais de hidroxiapatita. Os *debris* se originaram de microcorte, constituídos de matéria orgânica e inorgânica, descontínuos devido à propagação das trincas por algumas direções preferenciais. Não foi observado encruamento e nem movimentação de discordâncias, mecanismos responsáveis pelo desgaste no grupo de comparação formado por materiais metálicos⁵⁰.

Um indentador de grande raio de curvatura (1200 nm), cônico, só começa a desgastar o esmalte a partir de um determinado valor de carga normal aplicada, mesmo após 20 riscos na superfície. Isto evidencia a existência de um valor limiar, abaixo do qual as tensões no contato não são suficientes para iniciar a propagação de trincas. Neste estágio, foi relatado que a dissipação de energia pode ocorrer preferencialmente nas proteínas existentes entre os cristais. Com o movimento alternado ou aumento da carga aplicada, há nucleação e propagação de trincas, responsáveis pelo destacamento de material⁶¹.

Para verificar a reatividade do esmalte com o meio e seu efeito no desgaste, cúspides de esmalte foram ensaiadas em deslizamento alternado contra amálgama em meios de diferentes pH⁶². Baixas taxas de desgaste, redução do coeficiente de atrito com o tempo e presença de filme depositado sob a superfície do esmalte foram resultados do desgaste em meio com pH entre 3,3 e 3,5; o autor sugere que a presença deste filme sobre a superfície pode atuar na dissipação de energia e redução do desgaste. Alta taxa de desgaste foi acompanhada pela elevação do coeficiente de atrito com o tempo e por mecanismos frágeis de deslocamento em meio com pH mais baixo que o acima mencionado.

Outros estudos também verificaram a interrelação entre a carga aplicada e o meio para entender o desgaste do esmalte decorrente da atrição e da corrosão (erosão)^{46, 47}. Em deslizamento de cúspides de esmalte contra plano de esmalte humano, em meios alternados de ácido cítrico de diferentes pH e de solução salina, foram aplicadas variadas cargas normais em tempos de ensaio distintos. Os autores relatam maior profundidade da trilha de desgaste em meio de pH neutro, com presença de trincas no esmalte e *debris* sob a superfície. Em meio de pH ácido, o desgaste foi menor e o ácido produziu superfícies menos rugosas, com poucos *debris* aderidos e com sulcos na direção do movimento. O aumento da carga aplicada e do tempo de ensaio resultou em aumento da profundidade do desgaste de maneira não linear.

Embora essa comparação entre esmalte e cerâmicos pareça evidente por causa da natureza frágil de ambos materiais e da reatividade com o meio, alguns estudos^{63, 64} relataram similaridades entre metais dúcteis e o esmalte no que diz respeito aos micromecanismos de desgaste, aos aspectos morfológicos da trilha

desgastada e na resposta à lubrificação com água. Denominam de delaminação^a o micromecanismo presente no esmalte em ensaio de deslizamento alternado de plano de esmalte contra esfera de liga de titânio. Relatam redução do volume de desgaste do esmalte quando lubrificado com água destilada, similar ao encontrado para o par metálico e distinto do encontrado para o par alumina contra metal – o desgaste triboquímico da alumina foi negligenciado.

A resposta tribológica do esmalte também varia com a variação das propriedades mecânicas, tanto em função da anisotropia do tecido quanto da profundidade da camada (a estrutura do esmalte e suas propriedades mecânicas estão descritas na seção 2.2, página 38).

Em ensaio de nanoesclerometria linear em esmalte de incisivos, notou-se que quanto mais próximo da junção amelodentinária, maior o coeficiente de atrito e o volume de desgaste. Para uma carga fixa, a taxa de desgaste aumentou exponencialmente com o aumento da proximidade à junção amelodentinária, longitudinalmente aos prismas⁸.

Em ensaio de plano de esmalte contra esfera de titânio também foi investigada a relação tribológica com a estrutura do tecido. Nas camadas mais superficiais, com prismas perpendiculares à superfície, foram encontrados baixo coeficiente de atrito e menor profundidade de desgaste que nas camadas mais profundas e com prismas paralelos à superfície⁵⁶.

Para estudar o desgaste do esmalte, então, parece fundamental minimizar a variação das propriedades mecânicas nos espécimes a serem estudados, principalmente as propriedades que influem diretamente no desgaste, como dureza e tenacidade à fratura.

Para padronizar os espécimes, alguns estudos utilizam a idade dos doadores dos dentes como critério de inclusão ou de seleção do esmalte, que pode variar em faixas de 25-40 anos^{51, 58} ou de 18-25 anos⁶². Em outros estudos, foram utilizados esmalte de pré-molares e molares para fabricação dos pares^{51, 58, 62}, bem como de terceiros molares, sem descrição da idade do doador^{46, 47}. Nestes estudos aqui citados, não há relato de medida das propriedades mecânicas para a caracterização

^a Delaminação é um mecanismo de desgaste dominado por deformações plásticas em que ocorre nucleação e crescimento de trincas sub-superficiais que se propagam paralelamente à superfície e levam à formação de partículas lamelares de desgaste¹⁹.

do tecido e nem indicativos de que este critério de seleção garanta que os esmaltes apresentem semelhantes propriedades.

Ante o exposto, mesmo fixando valores de carga, velocidade, temperatura e distância deslizada em um ensaio, é razoável esperar que o comportamento ao desgaste do esmalte varie entre dentes (intra e interindivíduos), entre regiões de um mesmo dente e entre direções, o que complica sobremaneira seu estudo tribológico.

Portanto, para que o estudo do desgaste tenha resultados consistentes, é importante selecionar o esmalte a partir de seus valores de dureza e tenacidade à fratura em conjunto com as variáveis do tribossistema carga, velocidade e lubrificação. O estudo do desgaste do esmalte é objeto de vários artigos^{8, 26, 27, 42, 46-48, 50, 51, 56, 58, 63, 64}, mas, não foram encontrados estudos que investigaram o desgaste e seus micromecanismos oriundos do deslizamento alternado de incisivo contra incisivo, configuração que mais se aproxima do tribossistema real de atrição, variando a carga normal e a lubrificação de pares com propriedades mecânicas próximas (dureza e tenacidade à fratura).

3 OBJETIVO GERAL

Investigar o desgaste por deslizamento de esmalte contra esmalte dental, variando a carga normal aplicada e os meios de lubrificação.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo principal, este estudo empregou um método para investigar as propriedades do tribossistema em casos de esmalte que desliza sobre esmalte dentário numa configuração que se aproxima das condições clínicas em que ocorre o bruxismo. Para tanto, será necessário:

- construir pares de espécimes que comportem um estudo tribológico de deslizamento alternado, partindo de incisivos bovinos;
- selecionar os pares a serem ensaiados a partir das propriedades de dureza e de tenacidade à fratura, dentro de uma faixa de valores relativamente estreita; e
- realizar ensaios com variações de carga normal (8 N e 16 N) e quatro condições de lubrificação: saliva natural, saliva artificial e gel lubrificante oral Oralbalance® (Biotène) comparadas com um grupo controle sem lubrificação (seco). Para tanto, será necessário mensurar os coeficientes de desgaste, a rugosidade da superfície, o coeficiente de atrito e determinar os micromecanismos de desgaste.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PREPARAÇÃO DOS ESPÉCIMES PARA ENSAIO

Foram utilizados dentes incisivos bovinos, preferíveis aos humanos pelo tamanho e disponibilidade. O esmalte bovino apresenta uma microestrutura muito similar ao humano em constituintes (cristais de hidroxiapatita e componentes orgânicos), tamanho e forma dos prismas. Difere, porém, quanto ao raio das nanopartículas de apatita (22-23 nm), consideravelmente menor^b que o de dentes humanos (110-200 nm)^{49, 50, 65, 66}. Esta pesquisa obteve o certificado de isenção da Comissão de Ética no Uso de Animais da FOU SP (ANEXO A).

Para confecção dos espécimes ensaiados, as raízes foram eliminadas e as coroas cortadas com discos diamantados (distância de 15 mm entre cortes inciso-cervicais). Os 10 mm cervicais das coroas cortadas foram incluídos em um molde de silicone (Figura 4.1) e embutidos com resina acrílica ativada quimicamente. Os espécimes embutidos foram denominados:

- corpo – incisivo embutido com o plano incisal exposto pelo corte, em forma de arco, com aproximadamente 15 mm de comprimento méso-distal e cerca de 1 mm de largura da camada de esmalte. Nela, as dimensões são suficientes para conter a trilha de desgaste, de aproximadamente 0,3 mm de largura e 7 mm de comprimento (Figura 4.2);
- contra-corpo – fragmento de incisivo embutido, com forma de palito longitudinal ao dente, formado pelo corte inciso-cervical da coroa com 3 x 15 mm. Após embutimento dos 2/3 cervicais em resina, o extremo incisal recebeu novos cortes, nas faces vestibular e lingual, a 45° em relação ao seu longo eixo. Um terceiro corte, perpendicular ao longo eixo do palito, formou uma superfície plana em esmalte, voltada para incisal, livre de dentina, de aproximadamente 0,3 mm de largura por 3 mm de comprimento (Figura 4.3). Este palito de

^b O tamanho das partículas de apatita no esmalte humano é de 100-200 nm⁶⁵ (página 1001), porém, outros autores⁴⁹, em referência a este artigo, apresentaram a medida de 100-200 µm para as mesmas partículas (na página 503 do artigo).

esmalte apresentava o suporte necessário em dentina, aquém da borda, para dar robustez e evitar a fratura durante o ensaio. Todos estes cortes foram feitos com um dispositivo idealizado para esta finalidade (Figura 4.4).

Depois de confeccionados, e entre todas as etapas laboratoriais, os corpos e contra-corpos foram armazenados em cloramina (0,5%) a 4° C. Antes de cada ensaio, os espécimes ficaram imersos em água destilada por 24 horas a 4° C para a eliminação dos resíduos de cloramina.

Figura 4.1 – Moldes de silicone para confecção das bases dos: (A) corpo e (B) contra-corpo

Figura 4.2 – Corpo: (A) localização dos cortes (linhas tracejadas) para eliminação da raiz, próximo à junção amelocementária e para planificação da região incisal; (B) após os cortes; (C) após seu embutimento em resina; e (D) detalhe da vista incisal do esmalte, com destaque para a região prevista para a trilha de desgaste

Figura 4.3 – Contra-corpo: (A) localização dos cortes e tamanhos; (B) vista vestibular do palito formado pelos cortes e (C) vista proximal; (D) vista vestibular após embutimento em resina; (E) as linhas tracejadas brancas indicam os cortes nas faces vestibular e lingual (em ângulo reto) e a amarela indica o corte para planificação; e (F) demarcação da área plana incisal do contra-corpo (retângulo em preto) que entrará em contato com o corpo para a formação da trilha de desgaste

Figura 4.4 – (A) Vista superior do dispositivo com o contra-corpo posicionado no suporte para cortes a 45° nas faces (B) vestibular e (C) lingual; (D) vista lateral do dispositivo com o contra-corpo posicionado no suporte para corte a 90° e (E) vista superior

Após embutimento, a superfície incisal do corpo foi preparada com lixas abrasivas de carbeto de silício de granulometria 600 a 1200 *mesh*, seguido de polimento com alumina de 6, 3 e 1 μm . A superfície do contra-corpo foi polida com a sequência de discos de polimento Sof-lex® (3M), seguido de pasta diamantada de 4 e 2 μm em disco de feltro. Todos os espécimes foram limpos em banho ultrassônico com água destilada (10 minutos).

O parâmetro de rugosidade S_q dos corpos foi determinado no analisador tridimensional de superfícies (ATS) CLI 1000® (Taylor Hobson) utilizando o software TaylorSurf. do laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo. O método utilizado foi o indutivo (com apalpador), que mede até 2,5 mm com resolução de 40 nm. O equipamento possui um programa de análises 3D para geração de imagens e cálculos dos diversos parâmetros topográficos. O valor da rugosidade R_a também foi medido e resultou em $0,08 \pm 0,05 \mu\text{m}^c$.

Após corte, embutimento e polimento, os corpos e contra-corpos passaram por uma última seleção pela medida de microdureza. Só foram utilizados neste estudo os que apresentaram valores semelhantes de microdureza da superfície, como descrito a seguir.

4.2 SELEÇÃO DOS CORPOS E CONTRA-CORPOS

Para seleção dos corpos e contra-corpos, antes do ensaio de deslizamento, foram realizados ensaios de microdureza Vickers em microdurômetro PANTEC® (Panambra Tecnologia) do TRICORRMAT UFES sob carregamento de 2,94 N (300 gf) por 15 s^{3, 57, 67}.

As indentações para a medida de microdureza do corpo foram realizadas nas regiões mesial e distal da mesma superfície incisal que sofreu desgaste (porém, antes do ensaio de desgaste), três em cada região (imagem A da Figura 4.5). O espaçamento mínimo entre as indentações foi de três vezes a medida da diagonal da indentação formada.

As indentações para a medida de microdureza no contra-corpo foram realizadas na superfície incisal de um fragmento proveniente da mesma coroa utilizada para confeccionar o contra-corpo (imagem B da Figura 4.5). O

^c Esta medida de rugosidade é inferior a $0,64 \pm 0,25 \mu\text{m}$ (média $\pm$ DP), encontrada para áreas de contato esmalte-esmalte de molares⁶⁷. O baixo valor de rugosidade obtido com o polimento é um dos pré-requisitos necessário em ensaios tribológicos para que o tribossistema seja o mais controlado possível²⁵.

espaçamento mínimo entre as indentações foi de três vezes a medida da diagonal da indentação formada.

Foi atribuída a cada corpo a média de microdureza das 6 indentações realizadas nele, ou nos respectivos fragmentos laterais, no caso dos contra-corpos. Para reduzir a variabilidade, foram excluídos do experimento aproximadamente 30% dos pares preparados. O critério utilizado foi excluir os espécimes com valores fora de $200 \pm 21 \text{ HV}_{0,3}^d$.

Figura 4.5 – Localização das indentações para medida da dureza: (A) no corpo; (B) para o contra-corpo

4.3 LUBRIFICANTES

Foram utilizados três tipos de lubrificantes:

- Saliva natural estimulada, coletada de uma única doadora, instruída a não beber e nem comer por 1 hora antes da coleta de saliva. Durante a coleta, a doadora permaneceu sentada confortavelmente em uma cadeira enquanto mastigava um filme polimérico semitransparente, sem cor, sem odor, sem sabor e resistente à água (Parafilm®,

^d 200 HV equivalem a 2 GPa. Esta faixa de valores foi determinada depois de medir a microdureza em 23 pares para o estudo piloto; a maioria dos pares apresentou valores de dureza dentro desta variação. A partir daí, quando era necessário confeccionar um novo par, ele seria aceito se a sua dureza estivesse na faixa entre 179 e 221 $\text{HV}_{0,3}$.

American National Can.). A saliva gerada no primeiro minuto foi descartada. A saliva estimulada coletada foi dispensada em um frasco estéril, em intervalos de 1 minuto, o volume final coletado foi de 6 ml. O recipiente com a saliva foi mantido à temperatura ambiente e, imediatamente após a coleta, 0,5 ml de saliva foi depositada na superfície plana de cada corpo (com auxílio de seringa graduada) para a realização dos ensaios lubrificados. A doadora assinou o termo de consentimento livre e esclarecido e consentiu em participar deste estudo, aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da FOUSP, sob número 919.059 (ANEXO B).

- b) Saliva artificial com pH 7,0 e a seguinte composição⁶⁸: fosfato de potássio monobásico 0,025M; fosfato de sódio bibásico 0,024M; bicarbonato de potássio 0,15M; cloreto de sódio 0,1M; cloreto de magnésio 0,0015M; cloreto de cálcio 0,015M; ácido cítrico 0,025M. Esta saliva, melhor definida como uma solução tamponada por não apresentar constituintes orgânicos, foi manipulada no laboratório de Biologia Oral da FOUSP. De maneira semelhante à saliva natural, 0,5 ml de saliva artificial foi depositada na superfície plana de cada corpo (com auxílio de seringa graduada) para a realização dos ensaios lubrificados.
- c) O gel (Oralbalance®, Biotène), que é um produto comercial indicado para alívio dos sintomas provenientes da xerostomia, possui pH 6,5 e é composto de glicerina, água, sorbitol, xilitol, carbômero, hidroxietilcelulose, hidróxido de sódio e propilparabeno⁶⁹. Este gel, com auxílio de uma pinça clínica e bolinha de algodão, foi depositado na superfície plana de cada corpo para a realização dos ensaios lubrificados, apenas o suficiente para molhar toda a superfície do plano – o excesso foi removido com o algodão. O volume depositado não foi medido. Para verificar se o esmalte sofreria alteração no valor da microdureza por causa da aplicação do gel, em um único corpo (não incluído no ensaio de deslizamento) foram realizadas indentações antes e após a aplicação do gel, de acordo com o método descrito na seção 4.2. Os valores encontrados de microdureza, antes e após a aplicação do gel, encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Medidas de microdureza Vickers no corpo lubrificado com gel

Local da indentação	Microdureza Vickers - HV _{0,3}				
	Antes do gel	Após 12 horas	Após 24 horas	Após 48 horas	Após 24 dias
Próximo à junção amelodentinária	155	155	158	155	156
Meio da camada	171	176	180	179	181
Próximo à vestibular	186	182	177	191	193

Pode-se notar que o valor da propriedade não foi alterado pela ação do gel, em condição estática. Isto, obrigatoriamente, não quer dizer que o mesmo também ocorra em condições tribológicas, visto que reações químicas entre os materiais e o lubrificante podem ser induzidas na presença de movimento²⁵. As pequenas diferenças encontradas entre os valores de microdureza provavelmente são oriundas da própria variação da propriedade, medida em locais distintos de cada região.

4.4 ENSAIO DE DESLIZAMENTO ALTERNADO

Os pares incluídos foram avaliados em lupa estereoscópica (Carl Zeiss), com aumento de 20 x; foram descartados os corpos ou contra-corpos que apresentaram trincas na região idealizada para a trilha de desgaste.

Os ensaios de deslizamento foram realizados no microtribômetro CETR® (Bruker Corporation) do TRICORRMAT UFES. Antes de todos ensaios, os dispositivos do equipamento foram calibrados de acordo com os procedimentos fornecidos pelo fabricante. O corpo foi movimentado de modo alternado no sentido méso-distal (Figura 4.6). Os parâmetros empregados no ensaio são apresentados na Tabela 4.2. O planejamento dos ensaios em seus subgrupos de pares deslizantes está esquematizado na Figura 4.7. A reprodutibilidade dos ensaios foi observada na similitude da evolução das curvas de coeficiente de atrito pelo tempo em cada condição.

Figura 4.6 – (A) Corpo e contra-corpo fixados ao microtribômetro CETR®; (B) vista proximal e (C) vista vestibular

Tabela 4.2 - Parâmetros do ensaio de deslizamento

Parâmetros do ensaio de deslizamento		Critérios
Carga normal	8 N e 16 N	15, 34, 70
Velocidade	2 mm/s	Valor estimado
Lubrificação	Seco, saliva artificial*, natural ou gel Oral balance®* (Biotène)	*Indicados para xerostomia
Número de ciclos	225	Necessário para o estágio estacionário
Distância deslizada	1,8 m	-
Tempo de duração	900 s	Necessário para o estágio estacionário
Frequência	0,25 Hz	Valor estimado
Número de pares, por subgrupo	03	-

Figura 4.7 – Grupos de pares dentais por carga aplicada e seus subgrupos de lubrificação

Para cada subgrupo, dois novos pares foram utilizados para ensaios interrompidos. Os espécimes foram ensaiados em experimentos de curto tempo de duração apenas sob carga normal de 8 N a fim de observar os estágios iniciais do desgaste^e. Cada ensaio foi interrompido na metade do tempo necessário para se atingir o estágio estacionário da curva de coeficiente de atrito pelo tempo; esse tempo foi distinto para cada uma das 4 condições de lubrificação, pois o comportamento instável da curva de coeficiente de atrito na fase inicial do deslizamento (*running-in*) variou em cada tribossistema. Os tempos de interrupção dos ensaios foram: seco (50 s); saliva artificial (25 s); saliva natural (20 s) e gel (20 s).

O volume de desgaste foi obtido no ATS utilizando o software TaylorSurf. Foram calculados os coeficientes de desgaste K e k (equação 2, página 33) a partir dos volumes de matéria perdida medido dos corpos^f.

^e Não foram realizados ensaios interrompidos sob carga normal de 16 N, pois o dano mecânico nesta condição não permitia distinguir estágios iniciais de desgaste.

^f A ausência de pontos de referência para realizar a medida de volume de desgaste do contra-corpo impediu a realização desta análise no analisador tridimensional. Caso fosse analisado o volume desgastado por peso, até mesmo a alteração do teor de água no material de embutimento ou na dentina do contra-corpo poderia interferir numa leitura correta do resultado do ensaio.

Em todos os ensaios, os sinais da força tangencial e normal foram adquiridos (com taxa de aquisição de 10 Hz) e registrados pelo equipamento (CETR®, Bruker Corporation), o que permitiu o cálculo do coeficiente de atrito pelo próprio equipamento através da razão entre a força tangencial e normal, medidas pelas células de carga apropriadas. A curva do coeficiente de atrito com o tempo foi utilizada para determinar: (1) o valor médio do μ no estágio estacionário, empregando a média móvel; (2) o tempo do ensaio interrompido (metade do tempo necessário para se alcançar o estágio estacionário). Além disso, o valor de μ foi interpretado em conjunto com as micrografias, com as variáveis carga e lubrificação e com as propriedades do tribossistema para determinação dos micromecanismos de desgaste.

Após o deslizamento, todos os pares foram limpos em ultrassom com água destilada (10 minutos) para a realização de novas medidas dos parâmetros de rugosidade Sq no ATS.

4.5 CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA POR PENETRAÇÃO

O valor da tenacidade à fratura K_{IC} (equação 4) de cada espécime foi calculado como a média a partir de 6 indentações Vickers sob carregamento de 9,8 N. O espaçamento mínimo entre as indentações foi de três vezes a medida da diagonal da indentação formada. As trincas formadas nos vértices das indentações foram medidas a partir do centro das mesmas^{57, 60}:

$$K_{IC} = 0,0319 \cdot \frac{P}{a \cdot l^{1/2}} \quad (4)$$

P : carga aplicada durante o ensaio microdureza Vickers (Kg);
 a : metade da diagonal da indentação (mm);
 $l = c - a$, em que c é o comprimento total da trinca a partir do centro da indentação (mm).

As indentações para o cálculo da tenacidade à fratura no corpo foram realizadas nas regiões mesial e distal da mesma superfície incisal que sofreu desgaste, após o ensaio de deslizamento, porém distanciadas da região da trilha, bem como das indentações realizadas para a medida de microdureza (imagem A da Figura 4.5).

As indentações para o cálculo da tenacidade à fratura no contra-corpo foram realizadas na superfície incisal de um dos dois fragmentos provenientes da mesma coroa utilizada para confeccionar o contra-corpo (imagem B da Figura 4.5). Estas indentações foram realizadas antes do ensaio de deslizamento.

O valor da tenacidade à fratura médio de todos os espécimes ensaiados foi de $1,26 \pm 0,11 \text{ MPa.m}^{1/2}$.

4.6 ANÁLISE AO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

Um par de cada subgrupo dos ensaios completos foi escolhido aleatoriamente para verificar o micromecanismo de desgaste atribuível aos pares de seu subgrupo, ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Evo 40® (Carl Zeiss) do TRICORRMAT UFES. Todos os pares dos ensaios interrompidos foram examinados ao MEV. Os espécimes examinados foram previamente desidratados por 24 horas à temperatura ambiente e recobertos, seguindo procedimentos de rotina, com carbono e ouro no metalizador de amostras K550® (Emitech).

4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para avaliar as diferenças entre as médias de volumes de desgaste e entre as médias dos valores do coeficiente de atrito nos corpos submetidos às diferentes cargas normais e lubrificação, foi utilizada uma Análise de Variância (ANOVA – dois fatores) e o teste de Tukey (ambos os testes com nível de significância de 5%), após comprovar a normalidade e homocedasticidade dos dados (Minitab 16®, Minitab Inc.; Statistica 8.0®, Stat Soft Inc.).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VOLUME REMOVIDO E COEFICIENTES DE DESGASTE

A análise de variância (ANOVA fatores aleatórios – dois fatores) dos valores de volume de desgaste apontou significância ($\alpha=0,05$; $p<0,001$) para todos os fatores: “carga normal”, “lubrificação” e a interação entre eles. Esse resultado e o de contraste de médias da interação pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$) estão apresentados na Tabela 5.1 e na Figura 5.1.

Tabela 5.1 – Médias de volume removido para a interação dos fatores “carga normal” e “lubrificação”. Os valores identificados com as mesmas letras são estatisticamente semelhantes entre si

Carga Normal (N)	Lubrificação	Volume removido (10^{-3}mm^3)	Tukey ($\alpha=0,05$)
		(média $\pm$ DP)	
8 N	Gel	$0,9 \pm 0,02$	a
	Seco	$3,0 \pm 0,89$	a b
	Saliva natural	$13,8 \pm 1,74$	a b
	Saliva artificial	$13,9 \pm 1,47$	a b
16 N	Gel	$17,8 \pm 2,54$	b
	Saliva artificial	$49,8 \pm 5,36$	c
	Saliva natural	$59,6 \pm 7,62$	c d
	Seco	$70,4 \pm 11,53$	d

Figura 5.1 - Volume removido médio dos corpos de esmalte bovino em diferentes condições de carga normal e lubrificação. Letras iguais indicam semelhança estatística pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Sob carga normal de 8 N, a lubrificação com as salivas (natural e artificial) conduziu a um volume médio de desgaste aproximadamente 4,5 vezes maior que na condição seca. No entanto, a análise de Tukey destes dados, quando feita em conjunto com os dados de 16 N, não permite afirmar que essas diferenças sejam devido à presença da saliva, talvez por causa da “contaminação” com os dados, muito mais altos, do desgaste ocorrido sob carga normal de 16 N. Por este motivo, foi realizada uma outra ANOVA exclusiva com os valores de 8 N⁹ para permitir a comparação apenas entre as médias obtidas sob esta carga normal. Como era de se esperar, a ANOVA apontou diferença significativa para o fator “lubrificação” ($p = 3,48987E-05$) e o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) revelou os grupos homogêneos apresentados na Tabela 5.2.

⁹ A análise estatística do grupo submetido à carga normal de 8 N revelou distribuição não normal, porém, como há homocedasticidade nas variâncias, utilizou-se o teste paramétrico para a nova análise estatística deste grupo (ANOVA; Teste de Tukey).

Tabela 5.2 – Médias de volume removido para o fator “lubrificação”, apenas sob carga de 8 N. Os valores identificados com as mesmas letras são estatisticamente semelhantes entre si

Carga Normal (N)	Lubrificação	Volume removido (10⁻³mm³) (média ± DP)	Tukey (α=0,05)
8 N	Gel	0,9 ± 0,02	a
	Seco	3,0 ± 0,89	a
	Saliva natural	13,8 ± 1,74	b
	Saliva artificial	13,9 ± 1,47	b

Na ANOVA feita com os valores de volume removido sob 8 N, o teste de Tukey detectou semelhança estatística entre as médias de volumes removidos nas condições 8 N - gel e 8 N - seco, mas, uma simples análise das médias e dos desvios-padrão destas duas condições mostram diferenças entre os valores, visto que 0,92 (0,9 + 0,02) é menor que 2,11 (3,0 - 0,89). O entendimento tribológico destes elementos numéricos é de maior complexidade que uma observação de comparação de médias e, portanto, deve-se ter cautela ao interpretar estas informações; esta interpretação deve ser realizada em conjunto com os outros resultados que serão apresentados neste estudo.

Espera-se que um lubrificante reduza o volume de desgaste, mas nem sempre esta relação pode ser estabelecida para os diversos tribossistemas^{19, 21}. Neste caso, houve redução do volume de desgaste na presença de gel, mas houve maior perda volumétrica na presença das salivas (artificial e natural), principalmente sob carga normal de 8 N.

Sob carga normal de 16 N, o contraste de médias pelo Tukey aplicado isoladamente para este grupo de carga normal, ou para o conjunto completo de dados (incluindo a carga normal de 8 N), indicaram as mesmas diferenças em função do lubrificante. Na lubrificação com o gel houve cerca de 4 vezes menos volume removido que na condição “seco” e cerca de 3 vezes menos volume removido que na condição lubrificada com as salivas (natural e artificial).

Os valores de coeficiente de desgaste adimensional (K), calculados para os corpos utilizando-se a equação de desgaste de Archard (descrita na página 33), e do coeficiente de desgaste dimensional ($k = K/H$) são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores de coeficiente de desgaste adimensional (K) e coeficiente de desgaste dimensional (k) dos corpos de esmalte nas diferentes condições de carga normal e de lubrificação

Carga Normal (N)	Lubrificação	Coeficiente de desgaste adimensional, K (10^{-5})	Coeficiente de desgaste dimensional, k ($10^{-4} \text{ mm}^3 (\text{N m})^{-1}$)
8 N	Seco	0,4	2,1
	Saliva artificial	1,9	9,6
	Saliva natural	1,9	9,5
	Gel	0,1	0,6
16 N	Seco	4,9	24,4
	Saliva artificial	3,4	17,2
	Saliva natural	4,1	20,6
	Gel	1,2	6,1

Sob 8 N, o coeficiente K indicou maior severidade do desgaste para as condições lubrificadas com salivas e, sob 16 N, a maior severidade foi encontrada para a condição seca. O desgaste no esmalte lubrificado com o gel foi o menos severo em cada subgrupo de carga normal. A relação entre as severidades é apresentada na Tabela 5.4. Por exemplo, a condição 16 N – seco apresenta uma severidade 49 vezes maior que a condição 8 N – gel, isto é, há uma probabilidade 49 vezes maior de se gerar *debris* na condição 16 N – seco do que na condição 8 N – gel, de acordo com uma das interpretações do valor de K (ver seção 2.1.2, a partir da página 33).

Tabela 5.4 – Relação entre as severidades dos desgastes (K) dos corpos nas várias condições de carga normal e de lubrificação

$K_{\text{linha}}/K_{\text{coluna}}$	Relação entre as severidades do desgaste K							
	8 N – gel	8 N – saliva artificial	8 N – saliva natural	8 N – seco	16 N – gel	16 N – saliva artificial	16 N – saliva natural	16 N – seco
8 N – gel	-	0,05	0,05	0,25	0,08	0,03	0,02	0,02
8 N – saliva artificial	19	-	1	4,75	1,59	0,56	0,46	0,39
8 N – saliva natural	19	1	-	4,75	1,59	0,56	0,46	0,39
8 N – seco	4	0,21	0,21	-	0,34	0,12	0,09	0,08
16 N – gel	12	0,63	0,63	3	-	0,35	0,29	0,24
16 N – saliva artificial	34	1,79	1,79	8,5	4,08	-	0,83	0,69
16 N – saliva natural	41	2,16	2,16	10,25	3,42	1,21	-	0,83
16 N – seco	49	2,58	2,58	12,25	4,08	1,44	1,19	-

O coeficiente de desgaste dimensional aumentou em função do aumento da carga normal, apesar das diferentes condições de lubrificação (Figura 5.2). Sob carga normal de 8 N, o coeficiente k foi maior para as condições de ensaio lubrificadas com as salivas (artificial e natural) e semelhantes entre si; a lubrificação com o gel reduziu o coeficiente k em uma ordem de grandeza, em relação às salivas. Sob carga normal de 16 N, o maior valor de k foi encontrado para a condição “seco”; o valor de k na condição lubrificada com gel foi próximo ao encontrado para a condição lubrificada com as salivas sob 8 N.

Figura 5.2 – Coeficiente de desgaste dimensional k médio para as diferentes condições de carga normal e lubrificação

5.2 COEFICIENTE DE ATRITO

As médias dos valores do coeficiente de atrito obtidos na parte estacionária da curva de coeficiente de atrito em função do tempo estão apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Valores de coeficiente de atrito (μ) encontrados para o esmalte nas diferentes condições de carga normal e de lubrificação – valores médios obtidos da média variável de três pares ensaiados em cada condição. Os valores identificados com as mesmas letras são estatisticamente semelhantes entre si

Lubrificação	μ - COEFICIENTE DE ATRITO	
	Carga normal 8 N	Carga normal 16 N
Seco	$0,75 \pm 0,03^a$	$0,87 \pm 0,03^b$
Saliva artificial	$0,80 \pm 0,03^{ab}$	$0,80 \pm 0,02^{ab}$
Saliva natural	$0,74 \pm 0,01^a$	$0,73 \pm 0,06^a$
Gel	$0,25 \pm 0,05^c$	$0,26 \pm 0,02^c$

Para o sistema tribológico deste estudo, a primeira lei do atrito se verifica para todas as condições lubrificadas, exceto para o seco. Esta exceção indica o caráter sistêmico do atrito^{35, 36}.

Em ambas cargas normais aplicadas, o valor do coeficiente de atrito foi cerca de 3 vezes menor quando os pares foram lubrificados com gel, comparando-se às demais condições; a condição menos severa, 8 N – gel, apresentou o menor coeficiente de atrito e a mais severa, 16 N – seco, o maior coeficiente de atrito ($\Delta \cong 250\%$). Apesar do teste estatístico não ter encontrado diferenças significantes entre o coeficiente de atrito na condição 16 N – seco e nas condições 8 N e 16 N – saliva artificial, em termos tribológicos, o primeiro é superior aos outros dois. Isto pode ser ratificado pelos maiores valores de rugosidade S_q , pela presença de

micromecanismos frágeis (ambos apresentados nas seções 5.3 e 5.4.9, respectivamente) e, conseqüentemente, maior coeficiente de desgaste k .

A amplitude da variação do coeficiente de atrito com o tempo, durante os ensaios, pode ser verificada na Figura 5.3 e na Figura 5.4. As curvas de coeficiente de atrito em função do tempo atingem o estágio estacionário e são condizentes com os valores médios encontrados.

Figura 5.3 – Coeficiente de atrito em função do tempo (s) para um par ensaiado com carga normal de 8 N em cada uma das condições de lubrificação: (A) seco; (B) saliva artificial; (C) saliva natural; (D) gel. Em cinza: nuvem de pontos dos valores individuais; em preto: curva da média variável, obtida a cada 10 s

Figura 5.4 – Coeficiente de atrito em função do tempo (s) para um par ensaiado com carga normal de 16 N em cada uma das condições de lubrificação: (A) seco; (B) saliva artificial; (C) saliva natural; (D) gel. Em cinza: nuvem de pontos dos valores individuais; em preto: curva da média variável, obtida a cada 10 s

A complexa relação entre o atrito e o desgaste, já reportada na literatura^{19, 33, 35, 36}, pode ser visualizada no gráfico da Figura 5.5. Observa-se que uma relação direta entre atrito e desgaste nem sempre pode ser estabelecida. Para tal, salientam-se dois exemplos: 16 N - gel e 8 N - seco. O primeiro apresenta o menor coeficiente de atrito e um alto valor de coeficiente de desgaste. Inversamente, o segundo apresenta um alto valor de coeficiente de atrito e um baixo valor de coeficiente de desgaste. Esta não linearidade entre atrito e desgaste, para os casos deste estudo, será melhor compreendida a partir da identificação dos micromecanismos, na seção 5.4.

Figura 5.5 – Coeficiente de atrito (μ) em função do coeficiente de desgaste dimensional (k) (A) e em escala logarítmica (B) do esmalte nas diferentes condições de carga normal e de lubrificação

5.3 DESVIO QUADRÁTICO MÉDIO S_q

O parâmetro de rugosidade S_q após o polimento dos corpos, antes dos ensaios tribológicos, foi de $1,17 \pm 0,05 \mu\text{m}$. Os valores finais, obtidos nas trilhas dos corpos ensaiados em cada condição de carga aplicada e lubrificação, encontram-se na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Parâmetro de rugosidade S_q médio dos corpos de esmalte bovino em diferentes condições de carga normal e lubrificação

Sabe-se que nem sempre há uma relação diretamente proporcional entre desgaste e rugosidade¹⁹. Isto pôde ser notado nas condições de ensaio sob carga normal de 8 N: os pares com maior volume de material removido (lubrificados com as salivas) apresentaram valores de rugosidade S_q muito próximos aos encontrados na condição inicial (antes do ensaio), o que indicou que o maior desgaste não foi acompanhado de aumento da rugosidade da superfície. Na condição seca, houve

menor volume de desgaste e maior rugosidade da superfície, comparando-se à condição inicial. Entretanto, sob 16 N, a relação direta entre rugosidade e desgaste pôde ser estabelecida. A avaliação das propriedades do tribossistema se faz necessária para a melhor compreensão do fenômeno; esta será apresentada adiante.

5.4 MICROMECHANISMOS DE DESGASTE

5.4.1 Aspectos gerais das trilhas de desgaste

A seguir serão destacadas algumas características frequentemente encontradas e que se podem considerar comuns a quase todos os casos:

- A. Foi possível distinguir a região desgastada da área polida. A Figura 5.7 mostra uma região de trilha de desgaste (metade superior) acima de uma região que manteve o polimento inicial. Enquanto na região polida não foi possível distinguir diferenças de relevo, na região desgastada nota-se um padrão regular. Este padrão parece refletir alguns aspectos microestruturais do esmalte, evidenciando que o desgaste não é uniforme e fica condicionado às características histomorfológicas. Algumas estruturas histológicas do esmalte dental, descritas na seção 2.2, na página 38, são reveladas nas superfícies desgastadas da Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10. A evidenciação de prismas em superfícies de desgaste pode, por hipótese, ocorrer por dois motivos: ou pelo desgaste maior da região interprismática (o que teria ocorrido, por exemplo, na Figura 5.8, na qual notamos uma grande área com este tipo de padrão), ou pela exposição de uma superfície de fratura. A superfície de fratura deste material estruturado a partir de cristais colunares dispostos em diferentes padrões de orientação revela a existência destes padrões, já que, muito

provavelmente, as trincas se propaguem mais facilmente em certas direções ditadas pela orientação dos cristais (Figura 5.10).

Figura 5.7 - Distinção entre a trilha de desgaste e a área além da trilha de um desgaste moderado da superfície do esmalte do corpo vista ao MEV - ensaio interrompido, 8 N - gel

Figura 5.8 – Esquema de um bloco de esmalte – adaptado de Ferraris e Muñoz² – e imagem de MEV evidenciando as estruturas histomorfológicas encontradas em uma trilha de desgaste do corpo formada num plano de corte oblíquo ao eixo longitudinal de orientação dos prismas - ensaio interrompido, 8 N - gel

Figura 5.9 – Esquema de um bloco de esmalte – adaptado de Ferraris e Muñoz² – e imagem de MEV evidenciando as estruturas histomorfológicas encontradas em uma trilha de desgaste do corpo formada num plano de corte transversal ao eixo longitudinal de orientação dos prismas - ensaio interrompido, 8 N - gel

Figura 5.10 – Estrias formadas sobre a trilha de desgaste no corpo, transversais à direção do deslizamento. No detalhe (que corresponde a uma região em que a camada superficial se desprendeu) pode ser observado que a largura entre as estrias comporta cerca de 3 prismas - ensaio completo, 16 N - seco

B. A largura da trilha variou com a severidade do desgaste: quanto mais severo o desgaste, mais larga a trilha. Como a geometria do contra-corpo é de um tronco de pirâmide, à medida que ele sofreu desgaste, a área em contato se tornou maior e, conseqüentemente, a da trilha também. Na Figura 5.11 pode ser observada a diferença entre as larguras de duas trilhas de desgaste, oriundas de ensaios completos distintos (tempo: 900 s).

Figura 5.11 – Esquema (I) e imagens em MEV (II) que ilustram o motivo da diferença entre as larguras das trilhas dos corpos obtidas em duas condições de ensaio: em (II-A) houve menor volume desgastado e trilha mais estreita – ensaio completo, 8 N – saliva natural; em (II-B) houve desgaste mais severo e trilha mais larga, que ocupa toda a largura da imagem - ensaio completo, 16 N – saliva natural. As regiões pontilhadas em I-A e I-B representam a altura do contra-corpo desgastada durante o ensaio. Note que a largura da face em contato do contra-corpo aumenta com o desgaste

C. O padrão de desgaste inicial, nem sempre evidente, especialmente nos ensaios completos, deve ter começado na região interprismática. Nos ensaios interrompidos, pôde ser observada a remoção preferencial de matéria na região interprismática, através de microfraturas localizadas,

o que destacou o contorno dos prismas (Figura 5.12). O desgaste preferencial dessa região já foi relatado, embora em ensaio de desgaste abrasivo de três corpos⁶³. Este desgaste foi atribuído aos seus menores valores de módulo de elasticidade e de dureza, devido à possível composição com maior teor de proteínas e à diferente orientação dos cristais de hidroxiapatita^{2, 9, 10}. O desgaste interprismático deixa os prismas sem sustentação. Com a dinâmica do movimento, estes prismas tornam-se propensos à fratura frágil, microfratura. O mesmo padrão foi notado também na periferia de trilhas em ensaios de alta carga normal ou no fundo de trilhas em que se nota o desprendimento dos *debris* aderidos.

Figura 5.12 – Área da trilha de desgaste do corpo observada ao MEV em que se evidenciam os contornos dos prismas devido ao desgaste preferencial da região interprismática - ensaio interrompido, 8 N - gel

D. No início dos ensaios, as superfícies dos pares, provavelmente, não estavam completamente conformes. Isto pode ter sido proveniente dos processos de confecção dos espécimes, da montagem dos espécimes na máquina (Figura 5.13) ou pela convexidade presente na superfície

após o polimento. A não conformidade foi melhor identificada nas imagens de MEV dos ensaios interrompidos secos e lubrificados com as salivas. Nestes ensaios, de pequeno tempo de duração, insuficiente para que o desgaste proporcionasse uma área de planos conformes, foi possível diferenciar regiões próximas com mecanismos de desgaste diferentes em função do gradiente de pressão Hertziana de contato. Na região onde a pressão Hertziana foi mais elevada, observaram-se áreas de prismas que se fragmentaram e deram origem aos *debris*. A ação mecânica no contato e a formação de *debris* promoveram a perda de camada(s) de prismas e expuseram uma nova camada de esmalte. Em contrapartida, nas regiões de menor pressão de contato, observou-se que a perda de matéria se iniciou na região interprismática, evidenciando o contorno dos prismas (Figura 5.14). Já nos ensaios completos, especialmente nos de alta carga, o padrão de desgaste em fundo de trilha não apresentou estas diferenças, o que se justificaria pelo paralelismo dos planos alcançado às custas de um maior desgaste (Figura 5.31, Figura 5.35 e Figura 5.37).

Figura 5.13 – Esquema ilustrativo das possibilidades de falta de paralelismo das superfícies após a montagem dos pares na máquina de ensaio. Na vista vestibular, nota-se uma inclinação do contra-corpo no sentido próximo-proximal (mésio-distal); na vista proximal, embora o eixo vertical do contra-corpo esteja alinhado, há uma inclinação do mesmo no vestibulo-lingual. As setas indicam a direção e sentidos do movimento

Figura 5.14 – Área da trilha de desgaste do corpo observada ao MEV em que se evidenciam duas regiões: na área de menor pressão Hertziana o desgaste ocorreu predominantemente na região interprismática - ensaio interrompido, 8 N - seco

A não conformidade, oriunda de uma convexidade na superfície do contra-corpo, ao invés do plano idealizado no corte (ver seção 4.1 de Materiais e Métodos, página 50, e Figura 4.3 na página 52) também pode ser notada, visto que a largura da trilha formada no corpo foi menor que a largura da superfície de contato do contra-corpo (0,3 mm). Além disso, a área com evidências de desgaste na superfície do contra-corpo estava localizada centralmente à área retangular exposta ao contato e ocupou apenas cerca de 1/3 da largura desta. Ainda, em torno da área desgastada na superfície do contra-corpo, foi possível identificar alguns riscos na superfície preparada para o contato, riscos estes provenientes do polimento; isto permitiu concluir que estas áreas não entraram em contato durante o ensaio e somente a região central o fez (Figura 5.15).

Figura 5.15 – Esquema (A) e imagem em MEV (B) que ilustram o motivo da diferença de conformidade entre o plano do corpo e o plano do contra-corpo devido à convexidade presente na superfície do contra-corpo. A largura da região desgastada na superfície do contra-corpo (delimitada pelas setas brancas) é inferior à largura da superfície preparada para entrar em contato (seta amarela). A imagem (B) corresponde ao contra-corpo apresentado nas imagens A da Figura 5.29, na página 95

E. Os micromecanismos de desgaste dos pares de corpo e contra-corpo foram semelhantes para cada condição de ensaio, mas, o desgaste observado no contra-corpo apresentou-se mais intenso. O desgaste aumentou em razão do permanente contato do contra-corpo com a superfície do corpo durante todo o ensaio (comprimento deslizado sobre a superfície do corpo = 7 mm; comprimento da superfície de contato do contra-corpo = 3 mm). Em razão da maior intensidade do desgaste, caracterizada pela presença de muitas superfícies de fratura, os micromecanismos foram melhor revelados na trilha de desgaste formada no corpo.

5.4.2 Carga normal 8 N, gel

As trilhas de desgaste dos ensaios interrompido e completo estão apresentadas na Figura 5.16. A trilha de desgaste apresentou-se estreita, tanto no ensaio interrompido quanto no completo.

No ensaio interrompido (imagens A da Figura 5.16), o corpo apresentou uma trilha pouco aparente, com desgaste na região interprismática; este desgaste só pôde ser distinguido em aumento de 5.000x (Figura 5.17). Logo, após poucos segundos de deslizamento, o desgaste se localizou na região interprismática, possivelmente oriundo de microfraturas localizadas. Estas microfraturas localizadas podem ter sido favorecidas pela orientação dos cristais e/ou pelos valores de propriedades mecânicas ali encontrados (ver seção 2.2, a partir da página 38). Não foram observados *debris* depositados sobre a trilha.

No ensaio completo (imagens B da Figura 5.16), o corpo apresentou-se com *debris* depositados sobre toda a trilha e lateralmente a ela, apesar dos métodos de limpeza dos espécimes. Isto pode ser atribuído à alta viscosidade do gel e à interação do gel com os *debris* e com a superfície. Os *debris* são poucos e de pequeno tamanho, condizente com o baixo valor do coeficiente k encontrado para esse subgrupo de carga e lubrificação. Microfraturas de prismas podem ser eventualmente notadas (Figura 5.18), e que, provavelmente, seriam responsáveis pela ocorrência de *debris*.

A regularidade da superfície, o baixo desgaste, o baixo coeficiente de atrito e a baixa rugosidade S_q da superfície, em conjunto, são indicativos de um desgaste moderado desta condição. O contorno dos primas é levemente evidenciado em menores aumentos. Em maiores aumentos é possível identificá-los por causa do desgaste preferencial da região interprismática oriundo de fraturas localizadas nesta região do esmalte. É possível deduzir que os *debris* originados do deslizamento, em determinados casos, se tornaram partículas abrasivas (terceiro corpo, neste caso) capazes de riscar a superfície, como em um processo microabrasivo⁴⁰ (Figura 5.19).

Figura 5.16 – Imagens das áreas centrais das trilhas de desgaste ao MEV obtidas no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes da trilha

Figura 5.17 – Imagem de parte da região central da trilha de desgaste ao MEV – ensaio interrompido

Figura 5.18 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo. As setas (amarelas) apontam as camadas que se destacam da superfície, origem de *debris*

Figura 5.19 – Imagem de parte da trilha de desgaste ao MEV – ensaio completo. As setas indicam *debris* que riscaram a superfície; o movimento dos *debris* ocorreu na direção do movimento. A trinca que aparece na imagem é um artefato da técnica microscópica, originada após a metalização

No início do deslizamento do contra-corpo (ensaio interrompido) (imagens A da Figura 5.20), não foi possível identificar o desgaste. Apenas são visíveis alguns riscos provenientes do polimento. Isto constitui, aparentemente, uma exceção ao fato identificado nos outros pares, em que o desgaste do contra-corpo foi visualmente maior que nesta condição. Uma hipótese para este caso seria que, devido à falta de paralelismo inicial dos planos, em conjunto com o efeito da lubrificação, o contra-corpo tenha contactado apenas numa área estreita.

Com o decorrer do ensaio, torna-se possível identificar o contorno dos prismas e áreas de destacamentos de prismas (imagens B da Figura 5.20), oriundas do desgaste inicial da região interprismática e posterior microfratura dos prismas (como apresentado na seção C, a partir da página 75).

Figura 5.20 - Imagens das áreas centrais da superfície do contra-corpo ao MEV no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes do desgaste

5.4.3 Carga normal 8 N, saliva artificial

No ensaio interrompido (imagens A da Figura 5.21), devido à não conformidade inicial no contato (ver item D da seção 5.4.1, a partir da página 76) e uma condição lubrificante inferior à anterior (maior μ), o desgaste se deu de modo mecânico, através de microtrincamento por mecanismos frágeis²¹.

Com a evolução do ensaio, isto é, no ensaio completo (imagens B da Figura 5.21), não são identificadas microtrincas evidentes, mas, existem áreas de destacamento aparentemente rasas que revelam o contorno dos prismas. Este destacamento da camada superficial pode se dar, inclusive, de modo plástico (imagem II-B da Figura 5.21 e na Figura 5.22). O alto desgaste e a baixa rugosidade

Sq encontrados para esta condição (ver subseções 5.1 e 5.3 nas páginas 62 e 71, respectivamente), em conjunto com as análises das micrografias, indicam a presença de um desgaste causado por reações triboquímicas, que podem ser predominantes sobre a ação mecânica.

Os *debris* se localizam sobre a trilha e lateralmente a ela, apesar dos métodos de limpeza dos espécimes, presumidamente pela interação estabelecida entre estes, o líquido lubrificante e a superfície. Estes *debris*, que se destacam de finas camadas, tendem a rolar entre as superfícies em contato e serem trabalhados plasticamente, adquirindo formas diversas. Embora os *debris* tenham ficado no contato, não foram notados eventos microabrasivos, distinguindo-se do ensaio lubrificado com o gel – a ausência de eventos microabrasivos é mais um indicativo da alteração química da superfície proveniente das reações triboquímicas.

Como apresentado na seção 2.3.1, a partir da página 42, os cerâmicos são susceptíveis às reações triboquímicas que induzem a nucleação e propagação de trincas, modificam a composição da superfície, aumentam a plasticidade da superfície ou agem na dissolução química do material¹⁹⁻²⁴. Comportamento similar ao do cerâmico foi notado neste estudo para o esmalte; pode-se sugerir que a presença de lubrificantes com água e sais neste tribossistema proporciona efeitos químicos que aumentam o desgaste ao mesmo tempo em que diminuem a rugosidade Sq da superfície^h.

Efeitos químicos também foram necessários para produzir superfícies de esmalte desgastadas, pouco rugosas e com aspecto brilhante, semelhante ao que se encontra clinicamente nas lesões de bruxismo⁴⁷. Isto ocorreu quando a atrição foi simulada em meio ácido. Semelhante ao relatado por estes autores, neste trabalho, destaca-se que o desgaste dental oriundo da atrição pode ser um processo complexo, multifatorial e dependente da interação química para a produção de superfícies lisas; a saliva artificial não evitou o desgaste elevado.

^h Os *debris* sobre a superfície, oriundos de microfratura de materiais frágeis no início do deslizamento, podem catalisar reações triboquímicas. Com o decorrer do tempo de deslizamento, os picos das asperezas se desgastam facilmente pela presença dessas reações e a superfície se torna menos rugosa²².

Figura 5.21 – Imagens das áreas centrais das trilhas de desgaste ao MEV obtidas no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. A trinca presente na imagem I-A e em I-B são artefatos de técnica. As setas indicam as áreas limítrofes da trilha

Figura 5.22 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo

No estágio inicial (ensaio interrompido), no contra-corpo (imagens A da Figura 5.23), os micromecanismos de desgaste são semelhantes ao do corpo, frágil com microtrincas e destacamento de camadas de material. No ensaio completo (imagens B da Figura 5.23), há desgaste triboquímico e mecânico. Pequenas áreas de destacamento expuseram prismas subjacentes, os quais parecem ter sido modificados por um efeito químico, semelhante a uma dissolução (imagem II-B da Figura 5.23).

Figura 5.23 – Imagens de áreas da superfície do contra-corpo ao MEV no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes do desgaste. No centro da imagem II-B é possível notar uma área em que houve destacamento da superfície e lateralmente, as trincas responsáveis pelo destacamento de fragmentos dessa camada

5.4.4 Carga normal 8 N, saliva natural

No ensaio interrompido (imagens A da Figura 5.24), devido a uma maior conformidade provável, não foi identificado microtrincamento na superfície, o que difere da condição lubrificada com saliva artificial. O corpo apresentou uma trilha de desgaste pouco demarcada, com desgaste preferencial das regiões interprismáticas. Este se deu, provavelmente, por microfratura localizada.

Nas imagens do ensaio completo (imagens B da Figura 5.24), é possível notar que houve desgaste preferencial na região interprismática. Também são identificados *debris*, apesar dos métodos de limpeza empregados. Microfratura foi de

difícil visualização por ser pouco frequente, mas, na Figura 5.25, esta pode ser notada.

Figura 5.24 – Imagens das áreas centrais das trilhas de desgaste ao MEV obtidas no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes da trilha

A análise conjunta das características dos micromecanismos aos resultados de alto volume de desgaste e de baixa rugosidade S_q (ver subseções 5.1 e 5.3 nas páginas 62 e 71, respectivamente) indicam a presença de reações triboquímicas, assim como identificado para a condição 8 N-saliva artificial. Sabe-se que a saliva natural difere da saliva artificial em muitos fatores, como viscosidade, composição, molhabilidade, concentração de proteínas e capacidade de adsorção de moléculas, mas, estas apresentaram semelhante potencial de interação triboquímica com o esmalte, notado nos resultados tribológicos deste estudo. Está além do escopo

deste estudo investigar as interações moleculares dos constituintes salivares que afetam o comportamento tribológico.

Sobre a superfície da trilha podem ser observados *debris* de formatos mais alongados que na condição lubrificada com saliva artificial (imagens B da Figura 5.24). O conteúdo proteico da saliva natural, a deformação plástica da camada que está se desprendendo da superfície, concomitante ao movimento, pode ter contribuído para conformar os *debris*.

Figura 5.25 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo; nota-se a região em que houve destacamento e exposição de prismas de esmalte

No estágio inicial do deslizamento (ensaio interrompido) (imagens A da Figura 5.26), o contra-corpo apresenta microtrincamento menos evidente, pois a conformidade foi provavelmente maior, identificada pela maior largura da trilha de desgaste. Os contornos dos prismas não são evidenciados por causa da deformação superficial. Com o decorrer do tempo (ensaio completo — imagens B da Figura 5.26), a superfície apresenta-se com áreas rasas de destacamento de prismas e que expõem novos prismas, eventos mais frequentes que os encontrados para o corpo.

Figura 5.26 – Imagens de áreas centrais da superfície do contra-corpo ao MEV no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas indicam as áreas limítrofes do desgaste

5.4.5 Carga normal 8 N, seco

Nas imagens dos ensaios interrompidos do corpo (imagens A da Figura 5.27), duas regiões distintas podem ser observadas, originadas em função do gradiente inicial de pressão Hertziana de contato (ver seção 5.4.1, item D, a partir da página 76). Na região onde a pressão Hertziana foi mais elevada, observam-se estrias oriundas de um processo plástico, que acarretam a remoção de material, origem de *debris*. Em contrapartida, nas regiões de menor pressão Hertziana, observa-se que o desgaste se iniciou na região interprismática, de modo a evidenciar o contorno dos prismas.

Figura 5.27 – Imagens das áreas centrais das trilhas de desgaste ao MEV obtidas no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento (uma explicação da figura II-A está na Figura 5.14 na página 78). As setas indicam as áreas limítrofes da trilha. A elipse sinaliza uma das áreas em que houve destacamento de camada de prismas, ampliada na Figura 5.28

As estrias (imagem II-A da Figura 5.27) apresentam um padrão periódico e regular, com uma distância inter-estrias bem superior àquela encontrada entre prismas e com largura compatível à largura da superfície do contra-corpo em contato. Estas se dispõem perpendicularmente à direção do movimento e podem ser consequência de algum tipo de vibração (rigidez do contato corpo/contra-corpo) que tenha surgido durante o deslizamento, devido, por exemplo, à ausência de um lubrificante. Assim, nestas regiões, tem-se uma pressão Hertziana alta e variável, devido às vibrações, o que justificaria o padrão de formação das estrias. Este mesmo padrão também apareceu nos ensaios sob carga normal de 16 N - seco (imagens A da Figura 5.37 na página 104) e 16 N – saliva artificial e natural, apenas nas extremidades da trilha.

No ensaio completo do corpo (imagens B da Figura 5.27), o desgaste foi predominantemente frágil, com trincas visíveis na superfície e que se direcionam aproximadamente perpendiculares à direção do movimento, preferencialmente através da região interprismática. A interseção de trincas, modelo frágil já descrito²¹, levou à remoção de camada(s) de prismas (Figura 5.28), o que justifica o maior valor de rugosidade S_q (ver seção 5.3 na página 71) encontrado para este grupo de carga aplicada (8 N). Embora o mecanismo frágil tenha predominado nesta condição, seu volume de desgaste foi cerca de 5 vezes inferior ao encontrado para as condições lubrificadas com as salivas. O maior desgaste na presença de um lubrificante, o que aparentemente parece ser um contrassenso, foi explicado pela presença de reações triboquímicas nos pares ensaiados com as salivas (ver seção 5.4.3 e seção 5.4.4).

Figura 5.28 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo

No ensaio interrompido (imagens A da Figura 5.29), o contra-corpo apresenta áreas de fratura e destacamento de material na região central da superfície de contato. Nas regiões limítrofes do desgaste é possível notar a propagação de trincas através da região interprismática, que seguem a orientação dos prismas – a orientação dos prismas é visível na área desgastada (Figura 5.30). Ao redor das áreas com microfratura, a superfície apresentou riscos oriundos do polimento; isto indicou a não conformidade entre as superfícies, que, em algumas regiões, não chegaram a contatar o corpo (ver seção 5.4.1, item D, a partir da página 76). Como o contato do contra-corpo em relação ao corpo se deu somente na região central do

primeiro, a alta pressão Hertziana favoreceu mecanismos frágeis no contra-corpo. Para o corpo, proporcionou o padrão estriado, conforme já discutido nesta seção.

No ensaio completo (imagens B da Figura 5.29), os micromecanismos de desgaste foram semelhantes aos do corpo, distintos apenas por apresentar mais frequentemente as áreas de fratura.

Figura 5.29 – Imagens de áreas centrais da superfície do contra-corpo ao MEV no ensaio interrompido (A) e no ensaio completo (B), em menor (I) e em maior (II) aumento. As setas brancas indicam as áreas limítrofes do desgaste. As cabeças de setas (amarelas) indicam o limite da área plana do contra-corpo. No centro da imagem II-A (asterisco vermelho) é possível notar uma área de interseção de trincas e início de destacamento de *debris*. Nota-se, também, a propagação de trincas pela região interprismática (área marcada com a elipse), ampliada na imagem da Figura 5.30

Figura 5.30 – Imagens em MEV de áreas de propagação de trincas nas regiões limítrofes do desgaste (setas). As trincas seguem uma direção preferencial através região interprismática (note que a orientação dos prismas e da região interprismática pode ser identificada na área desgastada, marcada com um sinal de mais). O asterisco (vermelho) sinaliza uma área de interseção de trincas e início de destacamento de *debris*. Aumentos de 3.000x (A) e de 5.000x (B)

5.4.6 Carga normal 16 N, gel

Sobre a superfície do corpo (imagens A da Figura 5.31), mesmo depois de ter sido lavado no banho ultrassônico, foi possível observar inúmeros *debris*, tanto sobre a trilha como lateralmente a ela, semelhante ao encontrado na condição 8 N – gel. Estes *debris* apresentam aspecto semelhante ao de materiais que são trabalhados plasticamente^{19, 33}.

Os *debris* podem ser oriundos da remoção de uma fina camada de material, resultante da interação do gel com a superfície durante o deslizamento, a qual se dá, provavelmente, por eventos plásticos (Figura 5.32) – a ausência de trincas na imagem reforça a existência destes mecanismos plásticos. Sob estas áreas de destacamento, revela-se o contorno dos prismas por desgaste da região interprismática.

Mesmo com a alta carga aplicada, o coeficiente de desgaste k para esta condição foi de valor próximo ao encontrado para a condição 8 N – salivas (ver seção 5.1 a partir da página 62) e o valor de μ foi semelhante ao encontrado para a condição 8 N – gel, ambos inferiores a todas as demais condições. Estes resultados

sugerem, mais uma vez, o potencial uso do gel como lubrificante ao promover baixo desgaste e baixo coeficiente de atrito.

No contra-corpo (imagens B da Figura 5.31) foram observadas áreas em que a região interprismática foi preferencialmente removida, mas, algumas regiões de deslocamentos são notadas. Estas regiões, provavelmente, são áreas de alto relevo que estavam em contato. Com o decorrer do deslizamento, estas áreas sofreram microfratura e trincas interprismáticas são notadas (imagem II-B da Figura 5.31). Trincas interprismáticas foram relatadas, também, na condição 8 N – seco, para o ensaio completo do corpo (na página 93).

Figura 5.31 – Imagens de áreas centrais da trilha sobre o corpo (A) e da superfície do contra-corpo (B) ao MEV, em menor (I) e em maior (II) aumento. As cabeças de setas (amarelas) indicam o limite da área plana do contra-corpo

Figura 5.32 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo. Na imagem em MEV, a seta aponta uma área com desgaste preferencial na região interprismática; o asterisco indica *debris* que se destacarão da superfície; limitado pela elipse é possível notar *debris* deformados que se destacaram da superfície

5.4.7 Carga normal 16 N, saliva artificial

O micromecanismo observado no corpo e no contra-corpo (Figura 5.33) foi semelhante ao já descrito para o contra-corpo da condição 8 N – saliva artificial, em que ocorreu o desgaste mecânico e triboquímico. Todavia, sob carga normal de 16 N, houve uma tendência de predomínio de mecanismos frágeis sobre os triboquímicos, ditados pela ação mecânica. Isto é evidenciado pela maior densidade

de trincas interprismáticas na superfície e de destacamento de prismas (Figura 5.34), o que levou a um maior dano superficial que a condição 8 N – saliva artificial, ratificado por uma severidade 80% maior (Tabela 5.4 na página 66) e uma rugosidade Sq duas vezes maior (Figura 5.6 na página 71).

Figura 5.33 – Imagens de áreas centrais da trilha sobre o corpo (A) e da superfície do contra-corpo (B) ao MEV, em menor (I) e em maior (II) aumento. Na imagem I-A, as setas indicam as áreas limítrofes da trilha; logo abaixo aparece a junção amelodentinária (que, neste caso se encontrava próxima da trilha, a qual se alargou durante o ensaio) como uma trinca. Na imagem I-B, as cabeças de setas indicam o limite da área plana do contra-corpo, já muito próximas da junção amelodentinária (que aparece como uma trinca na horizontal), devido ao elevado volume desgastado no contra-corpo; as setas apontam os limites das fraturas nas bordas proximais do contra-corpo

Figura 5.34 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo

Numa possível classificação crescente de eventos de desgaste dos espécimes lubrificados com saliva artificial, têm-se: contra-corpo sob 8 N; corpo sob 16 N; contra-corpo sob 16 N.

5.4.8 Carga normal 16 N, saliva natural

O corpo (imagens A da Figura 5.35) apresentou *debris* distribuídos sobre toda a trilha de desgaste, de maior tamanho que os encontrados para a condição 16 N - gel, condizente com os valores dos coeficientes de desgaste k encontrados para estas duas condições de ensaio.

A origem dos *debris*, notados na imagem II-A da Figura 5.35, parece ser a mesma encontrada para os *debris* presentes na imagem II-A da Figura 5.31, na página 29, diferem, entretanto, na espessura e tamanho: na condição lubrificada com saliva natural, os *debris* se apresentam mais espessos e com maior tamanho.

Estas duas condições de ensaio têm em comum a presença de um lubrificante com material orgânico; as mesmas estruturas não são vistas no ensaio lubrificado com saliva artificial. Ao que parece, existe interação entre a matéria orgânica destes lubrificantes e o esmalte, que resulta em *debris* de morfologias semelhantes. Ainda assim, o efeito de lubricidade do gel sobressai sobre a saliva natural, demonstrado pelos valores dos coeficientes de atrito, 0,26 e 0,73, respectivamente.

Figura 5.35 – Imagens de áreas centrais da trilha sobre o corpo (A) e da superfície do contra-corpo (B) ao MEV, em menor (I) e em maior (II) aumento. A área do canto superior esquerdo da imagem I-B está ampliada na imagem II-B

Em maior aumento é possível observar a área de destacamento de prismas (Figura 5.36) em que se evidencia a superfície de fratura e contorno dos mesmos. Reação triboquímica também pode ter ocorrido, mas, semelhante ao encontrado para a saliva artificial, os efeitos mecânicos nesta condição de alta carga predominaram sobre os triboquímicos.

Figura 5.36 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo

Sobre a superfície do contra-corpo (imagens B da Figura 5.35), nota-se que o desgaste pode ser oriundo tanto do destacamento de filmes finos (imagem I-B da Figura 5.35), os quais se deformam durante o movimento, quanto da microfratura

(imagem II-B da Figura 5.35). Mecanismo semelhante, quanto ao destacamento de filme, já foi descrito, por exemplo, para a condição 8 N – saliva natural (ver seção 5.4.4, a partir da página 88), porém, aqui, o mecanismo foi mais intenso em virtude do alto carregamento.

5.4.9 Carga normal 16 N, seco

Nas imagens do corpo (imagens A da Figura 5.37), nota-se o aspecto estriado da trilha, similar ao que foi visto no ensaio 8 N - seco (ver ensaio interrompido na seção 5.4.5 da página 92), porém mais intenso. O destacamento das camadas ocorreu por um micromecanismo frágil denominado de deslocamento, *flake-like wear* (ver seção 2.3.1, a partir da página 42). No contra-corpo (imagens B da Figura 5.37), os micromecanismos de desgaste também são predominantemente frágeis, com microfraturas e deslocamentos.

Mecanismos frágeis, já relatados no desgaste abrasivo de esmalte, foram nomeados de delaminação, por alguns autores^{51, 63}. Entretanto, neste estudo, foi adotada a definição tribológica clássica de deslocamento, a qual define mais adequadamente o micromecanismo de desgaste existente em materiais frágeis^{20, 21}.

O deslocamento revelou uma superfície de esmalte na qual é possível identificar o contorno dos prismas (Figura 5.38). Nesta condição, o desgaste foi o mais severo entre todas as demais condições, com micromecanismo completamente frágil, o que é condizente com os mais altos valores de K , de rugosidade S_q e de μ encontrados.

Não é esperado que, *in vivo*, haja desgaste tão severo oriundo da atrição, pois as taxas de desgaste tão elevadas resultariam em perda dental muito rápida. Porém, ao se comparar esta condição, 16 N - seco, com a 16 N - gel, pode-se destacar o potencial lubrificante do gel. O gel alterou o micromecanismo de desgaste, reduziu o desgaste, o coeficiente de atrito e a rugosidade S_q , comparando-se ao controle (seco). Esta é mais uma forte sugestão de seu uso potencial para redução ou prevenção do desgaste.

Figura 5.37 – Imagens de áreas centrais da trilha sobre o corpo (A) e da superfície do contra-corpo (B) ao MEV, em menor (I) e em maior (II) aumento. A elipse sinaliza uma das áreas em que houve deslocamento

Figura 5.38 – Imagem tridimensional da trilha de desgaste (ATS) com destaque para a região central (MEV) – ensaio completo

A imagem A da Figura 5.39, região central do corpo em menor aumento (200 x), apresenta quatro regiões com aspectos diferentes; aqui estas regiões serão descritas, da parte superior para a inferior.

Figura 5.39 – Imagem em MEV da trilha de desgaste no corpo. Em menor aumento (A) é possível distinguir quatro áreas, em faixas horizontais, de cima para baixo: uma região estriada e mais escura, com deslocamentos; logo abaixo, uma região estriada recoberta densamente por *debris*, de aspecto esbranquiçado; em seguida, uma área sem estrias e com abundantes *debris* deformados (sobre a qual está marcado o retângulo); e a quarta área, de uma superfície fora da trilha mas coberta parcialmente por *debris*. As setas indicam a região limítrofe da trilha. (B): ampliação do quadro da imagem (A). (C): ampliação do quadro da imagem (B)

Na região central da trilha (parte mais superior da imagem A da Figura 5.39), contra a qual o contra-corpo deslizou durante todo o ensaio, nota-se a existência de grandes e profundos deslocamentos, além do aspecto estriado formado sobre os *debris* compactados.

Numa segunda região, ainda coberta pelas estrias, há uma camada de *debris* compactados, de aparência esbranquiçada, mas ainda não deslocados.

Na terceira região, mais periférica da trilha, não é possível distinguir as estrias transversais, mas aparecem abundantes *debris* com aspecto de placas muito deformadas, mas que conservam alguma estrutura que lembra a disposição dos prismas (imagens B e C da Figura 5.39). Neste local, a superfície não apresenta os deslocamentos evidentes, presumidamente por se tratar de uma área que só

começou a entrar em contato quando o contra-corpo apresentou suficiente desgaste para aumentar sua área de contato. Com o aumento da área de contato, menor a pressão esperada nesta região. Soma-se a este fator, o menor tempo em contato por causa do aumento gradativo da área à medida que o desgaste aconteceu.

Na quarta região (parte mais inferior da imagem A da Figura 5.39), fora da trilha, aparecem *debris* aderidos (pois não se desprenderam durante a aplicação do ultrassom) sobre a superfície polida.

Esta mesma dificuldade em remover os *debris* da superfície de esmalte bovino desgastado sem a presença de lubrificante já foi relatada em um ensaio abrasivo de dois corpos (esclerometria): os *debris* apresentaram uma tendência em se aglomerar, diferente do que foi observado no esmalte humano. Os autores sugerem que alguma característica especial do conteúdo orgânico do esmalte bovino seja responsável por essa aglomeração⁵⁰.

5.5 DISCUSSÃO GERAL

A realização dos ensaios interrompidos permitiu identificar os micromecanismos de desgaste no estágio inicial, depois de apenas 20 - 50 s de deslizamento. Este tempo parece ser mais comparável com o tempo de duração do evento *in vivo*, pois os indivíduos que apresentam atividade rítmica dos músculos mastigatórios durante o sono rangem os dentes em episódios de, pelo menos, 25 s de duração; estes episódios podem ser ininterruptos por alguns minutos ou serem interrompidos por momentos sem movimento¹⁸.

O tempo total de ensaio (15 minutos) foi importante para que o micromecanismo de desgaste se reproduzisse nos tribossistemas, apesar de parecer exagerado para representar a duração do movimento na cavidade oral. Como esperado, os micromecanismos encontrados nos ensaios interrompidos se repetiram nos ensaios completos, com exceção do triboquímico, já que estes dependem da continuidade do movimento para que as reações ocorram^{21, 22, 24}.

Quanto à evolução dos micromecanismos, o início do desgaste no esmalte ocorreu na região interprismática. Este desgaste preferencial deve ter ocorrido em todas as condições de carga normal aplicada e de lubrificação, porém, foi mais

evidente quando a pressão no contato foi mais baixa (carga normal aplicada 8 N), a lubrificação foi eficiente (gel) ou o número de ciclos de deslizamento foi pequeno (ensaios interrompidos). Assim, como já relatado em ensaio de nanoesclerometria linear⁶¹, parece haver um valor limiar, abaixo do qual as tensões no contato não são suficientes para iniciar a propagação de trincas através dos prismas do esmalte; abaixo deste valor, a remoção de material se deu na região interprismática. Este valor limiar e desgaste preferencial da região interprismática podem explicar a ausência de grandes desgastes observados nos dentes de indivíduos com atrição.

Com o aumento da carga aplicada, ou lubrificação ineficiente, as altas tensões no contato podem induzir um micromecanismo predominantemente frágil, com nucleação e propagação de trincas, ou frágil associado às reações triboquímicas, que culminam com o destacamento de material. Em ordem crescente de severidade, os micromecanismos ocorreram por: remoção de material na região interprismática; propagação de trincas interprismáticas; reações triboquímicas associadas à ação mecânica; deslocamento (Figura 5.40).

Figura 5.40 – Esquema crescente de severidade do micromecanismo de desgaste para as condições de carga normal aplicada e de lubrificação

O aumento da carga normal aplicada resultou, para todos os subgrupos, em maior volume de desgaste. Este aumento não foi linearmente proporcional à carga

aplicada, conforme já relatado para inúmeros materiais^{19, 33, 38} (ver a partir da página 44). Isto porque micromecanismos distintos promoveram remoção de material em intensidades diferentes quando da interação da carga e lubrificação.

Resultado similar, de aumento do volume de desgaste do esmalte com o aumento da carga aplicada já foi relatado em outros estudos^{46, 63}; os autores justificam que a perda de proporcionalidade entre a carga aplicada e o volume de material removido possa ter ocorrido pela extensiva propagação de trincas no esmalte. Ressalta-se que não houve análise dos micromecanismos de desgaste em MEV para fundamentar esta hipótese e que a comparação quantitativa dos resultados de volume removido é difícil, pois são tribossistemas distintos.

A lubrificação com as salivas resultou em micromecanismos de desgaste até então não relatados para o esmalte: reações triboquímicas. A combinação de alto valor de k , rugosidade S_q final baixa (próxima à da condição inicial) e ausência de micromecanismos puramente frágeis fundamentam a hipótese de desgaste triboquímico. Como já relatado para materiais cerâmicos, as reações triboquímicas são de grande importância no desgaste destes materiais e evidenciam a existência de reatividade com o meio^{19, 33}. Em alguns cerâmicos óxidos, como extensivamente estudado para a alumina, o desgaste lubrificado com água aumenta a taxa de crescimento de trincas e proporciona maior volume removido que na condição não lubrificada^{19-22, 24, 25}. Esta possibilidade de reação com o meio é um dos aspectos que torna o esmalte similar a um cerâmico.

Contrária à observação de que a saliva natural atua na proteção contra o desgaste dental^{26, 28}, os resultados deste estudo evidenciam um maior coeficiente de desgaste quando os pares foram lubrificados com a saliva, comparando-se à condição seca (sob carga normal de 8 N). Ainda, há semelhança entre os valores dos coeficientes de desgaste dos pares lubrificados com as salivas natural e artificial.

A semelhança do efeito das duas salivas poderia ser atribuída à ausência de película adquirida sobre o esmalte dos pares lubrificados com a saliva natural, visto que os espécimes não ficaram em imersão em saliva, ou ainda, à degradação de componentes orgânicos da saliva natural à temperatura ambiente.

Dada a atrição simulada neste estudo, a película adquirida, que eventualmente tenha se formado após a deposição da saliva na superfície do plano, deve ter sido facilmente removida pela ação mecânica; mesmo se houvesse imersão, seria esperada a sua remoção durante o deslizamento. Esta hipótese pode

se fundamentar na literatura, que, após ensaios de nanoesclerometria, não encontrou efetividade da película adquirida em reduzir o desgaste do esmalte, mesmo após 60 minutos de imersão do mesmo em saliva natural⁴².

Pelo exposto, os resultados deste estudo indicam que a saliva natural foi insuficiente para atenuar o desgaste dental. Isto pode auxiliar a explicar o desgaste observado no esmalte de indivíduos com hábitos parafuncionais e fluxo salivar normal. A aplicação de um lubrificante, que minimize os efeitos do desgaste, pode ser uma possível forma de atenuar os danos causados ou aumentar o tempo útil do esmalte até que a perda volumétrica ocorra.

O gel, por sua vez, foi o único lubrificante que apresentou redução do desgaste e do atrito causado pela atrição simulada. Alguns enxaguatórios bucais^{44, 45}, ou mesmo substâncias ácidas⁴⁶⁻⁴⁸, podem reduzir a microdureza da superfície e, com isto, alterar a forma como o micromecanismo de desgaste ocorre. Porém, em condição estática (ver Tabela 4.1 na página 57), o gel não foi capaz de alterar o valor da microdureza da superfície. Sua ação, então, pode ser associada à formação de um filme lubrificante efetivo sem alterar as propriedades do esmalte. Este produto comercial, ainda não indicado como lubrificante dental, tem um uso potencial para este fim e sugere-se que estudos clínicos avaliem tanto o efeito lubrificante do gel no desgaste do esmalte *in vivo* quanto sua influência na sensibilidade do indivíduo à redução do coeficiente de atrito proporcionada durante o movimento parafuncional.

Finalmente, seja o desgaste do esmalte puramente mecânico (microabrasão, sulcamentos, trincas interprismáticas ou deslocamento) ou com interações triboquímicas, neste estudo notam-se claras semelhanças entre este tecido e os materiais cerâmicos^{16, 20-22, 24}.

Microssulcamentos já foram descritos em nanoesclerometria, com deformação plástica nos componentes orgânicos do esmalte, isto é, através da camada proteica existente entre os cristais de apatita⁵⁰. Neste estudo, em uma escala micrométrica, *debris* deformados plasticamente puderam ser notados no ensaio 8 N – saliva artificial (Figura 5.22 na página 87). Isto indica que a deformação plástica pode ocorrer não só na matéria orgânica, mas também na matéria inorgânica do esmalte; a deformação plástica pode ter sido favorecida pelas reações triboquímicas do tribosistema.

Micromecanismos frágeis também já foram descritos para o esmalte^{51, 58} e, semelhante ao que foi relatado neste estudo (deslocamentos), estes

desempenham um papel primordial para a grande perda volumétrica por desgaste dos materiais frágeis¹⁹⁻²².

Há alguns estudos que relatam a predominância de delaminação no desgaste do esmalte^{51, 63, 64}, micromecanismo que, conceitualmente, é dominado por amplas deformações plásticas^{19, 33}. Os autores explicam que o esmalte é um tecido altamente mineralizado, de alta dureza, mas, que este também apresenta uma “certa tenacidade” e, por isto, o esmalte difere do cerâmico⁶⁴. Em contrapartida, diversos autores^{8, 26, 27, 42, 46-48, 50, 58} não encontraram relevantes áreas de deformação plástica, encruamento e/ou movimentação de discordâncias no esmalte. Portanto, parece que o termo utilizado para descrever o micromecanismo de delaminação não descreve o fenômeno adequadamente.

Distante desses conceitos, o conjunto de resultados deste estudo reafirma a natureza frágil do esmalte sem, para isto, excluir seus microeventos eventualmente plásticos, assim como são os materiais cerâmicos. Ressalta-se, também, que “tenacidade”, como referido⁶⁴, se entendida como a propriedade mecânica denominada tenacidade à fratura, reforça a similitude do esmalte com o cerâmico. Os valores desta propriedade são, para esmalte bovino: 1,11-1,37 MPa.m^{1/2}; para esmalte humano: 0,7 - 1,55 MPa.m^{1/2}⁵⁷; para a sílica: 0,75 MPa.m^{1/2}⁶⁰; e para o carbetto de silício: 2,5 MPa.m^{1/2}⁶⁰, por exemplo.

Sabe-se que a cavidade bucal é um sistema tribológico complexo e que os ensaios realizados neste estudo estão longe de reproduzir fielmente a complexidade do desgaste proveniente da atrição dental. Assim, estes resultados não podem ser simplesmente extrapolados para a clínica. Entretanto, estes experimentos foram importantes para a compreensão dos micromecanismos e do efeito da carga e da lubrificação no desgaste do esmalte dental, até então não relatados para pares de incisivos em deslizamento alternado.

5.6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Não se tem parâmetros para julgar se este estudo conseguiu reproduzir os micromecanismos de desgaste encontrados *in vivo*, mesmo porque não foram encontrados estudos orientados a descobrir os micromecanismos em casos clínicos.

Porém, espera-se que o desgaste oriundo da atrição esteja dentro desta gama de variações, em virtude da variação de carga normal e efeito das diferentes lubrificações nos micromecanismos de desgaste encontrados.

Além disto, o modelo de desgaste desta pesquisa, apesar de ter muitas semelhanças com o bruxismo em humanos, apresenta algumas diferenças cuja influência sobre os mecanismos de desgaste é difícil de se prever:

- a utilização de esmalte bovino: apesar de possuir constituição semelhante ao de humanos, existem algumas diferenças de composição e microestrutura. Deve-se ressaltar a dificuldade de se utilizar esta metodologia em esmalte humano em razão de suas dimensões reduzidas para construir o contra-corpo que deslizasse em uma área tão reduzida de esmalte do corpo;
- os métodos de confecção dos pares deslizantes resultaram em superfícies não conformes, pelo menos nos estágios iniciais do deslizamento. Isto pode ter interferido principalmente nos ensaios interrompidos sob baixa carga normal aplicada; nestes casos, o volume de desgaste foi tão reduzido que o ensaio todo pode ter ocorrido sem chegar a existir conformidade entre as superfícies. Todavia, a variabilidade dos valores de volume de desgaste, coeficiente de desgaste, μ e rugosidade S_q entre os três pares ensaiados sob a mesma condição de carga e lubrificação foi baixa;
- a lubrificação dos espécimes foi realizada antes do início dos ensaios; na cavidade bucal, a lubrificação é feita de modo contínuo; e
- os lubrificantes foram usados isoladamente. Em um caso clínico, seria razoável esperar que, tanto o gel quanto a saliva artificial, poderiam ser encontrados misturados com saliva natural.

5.7 ESTUDOS FUTUROS

Como sugestão, estudos futuros podem:

- identificar micromecanismos de desgaste encontrados em dentes humanos em moldes/modelos e, assim, estabelecer um referencial para comparação;
- estudar as propriedades reológicas da saliva natural no contato deslizante e avaliar se a interação da saliva natural com os outros substitutos salivares influencia no desgaste;
- realizar ensaios de desgaste de esmalte imerso em salivas;
- realizar análise dos *debris* quanto à composição e estrutura; e
- utilizar o gel em estudos controlados *in vivo* para avaliar sua eficácia clínica na prevenção do desgaste. Como o gel já é comercializado para uso oral, não é esperado que existam prejuízos derivados do seu uso.

6 CONCLUSÃO

Os resultados do presente estudo permitem concluir que:

- 1) o método desenvolvido para o estudo tribológico da atrição de esmalte incisal permitiu discriminar a influência de diversos lubrificantes e cargas normais;
- 2) o aumento da carga normal aplicada resultou em aumento do volume de desgaste para todos os subgrupos de lubrificação, mas não houve linearidade entre estas quantidades;
- 3) a lubrificação com as salivas (natural e artificial) foi insuficiente para reduzir o desgaste, comparando-se ao grupo sem lubrificação;
- 4) a lubrificação com o gel foi o método mais efetivo para reduzir o volume de esmalte desgastado. Sob baixa carga (8 N), o volume de desgaste foi 3 vezes menor que a condição seca e 14 vezes menor que a lubrificada com as salivas. Sob alta carga (16 N), o volume de desgaste foi 4 vezes inferior ao volume de desgaste da condição seca e 3 vezes menor que a lubrificada com a saliva natural;
- 5) não se verificou a proporcionalidade entre o coeficiente de atrito e o de desgaste para todas as condições, mas os coeficientes de atrito dos pares lubrificados com o gel foram os menores;
- 6) não houve linearidade entre o parâmetro de rugosidade S_q com o coeficiente de atrito e com o coeficiente de desgaste para todas as condições; e
- 7) os micromecanismos de desgaste foram, em ordem crescente de severidade: desgaste da região interprismática (8 N - gel); propagação de trincas interprismáticas (8 N - seco); reações triboquímicas associadas à ação mecânica (8 N - saliva natural e artificial; 16 N - gel; 16 N - saliva natural e artificial); deslocamento (16 N - seco).

REFERÊNCIASⁱ

1. Katchburian E, Arana V. Esmalte. Histologia e embriologia oral. 3 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2012. p. 171-204.
2. Ferraris MEG, Muñoz AC. Esmalte. Histologia e embriologia bucodental: bases estruturais da patologia, diagnóstico, tratamento e prevenção odontológica. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2006. p. 245-86.
3. An B, Wang R, Arola D, Zhang D. The role of property gradients on the mechanical behavior of human enamel. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2012;9:63-72.
4. Kreulen CM, Van't Spijker A, Rodriguez JM, Bronkhorst EM, Creugers NH, Bartlett DW. Systematic review of the prevalence of tooth wear in children and adolescents. *Caries Res*. 2010;44(2):151-9.
5. Bartlett DW, Fares J, Shirodaria S, Chiu K, Ahmad N, Sherriff M. The association of tooth wear, diet and dietary habits in adults aged 18-30 years old. *J Dent*. 2011.
6. Carlsson GE, Johansson A, Lundqvist S. Occlusal wear. A follow-up study of 18 subjects with extensively worn dentitions. *Acta Odontol Scand*. 1985;43(2):83-90.
7. Hassan R, Caputo AA, Bunshah RF. Fracture toughness of human enamel. *J Dent Res*. 1981;60(4):820-7.
8. Jeng Y, Lin T, Hsu H, Chang H, Shieh D. Human enamel rod presents anisotropic nanotribological properties. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2011;4(4):515-22.
9. Xu HH, Smith DT, Jahanmir S, Romberg E, Kelly JR, Thompson VP, et al. Indentation damage and mechanical properties of human enamel and dentin. *J Dent Res*. 1998;77(3):472-80.
10. He LH, Swain MV. Understanding the mechanical behaviour of human enamel from its structural and compositional characteristics. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2008;1(1):18-29.

ⁱ De acordo com o Estilo Vancouver

11. Grippo JO. Abfractions: a new classification of hard tissue lesions of teeth. *J Esthet Dent*. 1991;3(1):14-9.
12. Grippo JO, Simring M, Coleman TA. Abfraction, abrasion, biocorrosion, and the enigma of noncarious cervical lesions: a 20-year perspective. *J Esthet Restor Dent*. 2012;24(1):10-23.
13. Grippo JO, Simring M, Schreiner S. Attrition, abrasion, corrosion and abfraction revisited: a new perspective on tooth surface lesions. *J Am Dent Assoc*. 2004;135(8):1109-18; quiz 63-5.
14. Hattab FN, Yassin OM. Etiology and diagnosis of tooth wear: a literature review and presentation of selected cases. *Int J Prosthodont*. 2000;13(2):101-7.
15. Regalo SC, Santos CM, Vitti M, Regalo CA, de Vasconcelos PB, Mestriner W, Jr., et al. Evaluation of molar and incisor bite force in indigenous compared with white population in Brazil. *Arch Oral Biol*. 2008;53(3):282-6.
16. Kato T, Yamaguchi T, Okura K, Abe S, Lavigne GJ. Sleep less and bite more: sleep disorders associated with occlusal loads during sleep. *J Prosthodont Res*. 2013;57(2):69-81.
17. Lavigne GJ, Rompre PH, Poirier G, Huard H, Kato T, Montplaisir JY. Rhythmic masticatory muscle activity during sleep in humans. *J Dent Res*. 2001;80(2):443-8.
18. Carra MC, Huynh N, Lavigne G. Sleep bruxism: a comprehensive overview for the dental clinician interested in sleep medicine. *Dent Clin North Am*. 2012;56(2):387-413.
19. Hutchings IM. Tribology: friction and wear of engineering materials. 5 ed. London: Arnold; 1999. 273 p.
20. Adachi K, Kato K, Chen N. Wear map of ceramics. *Wear*. 1997;203-204:291-301.
21. Kato K. Tribology of ceramics. *Wear*. 1990;136(1):117-33.
22. Kato K, Adachi K. Wear of advanced ceramics. *Wear*. 2002;253(11-12):1097-104.

23. Fischer TE, Anderson MP, Jahanmir S. Influence of fracture toughness on the wear resistance of yttria-doped zirconium oxide. *J Am Ceram Soc.* 1989;72(2):252-7.
24. Fischer TE, Zhu Z, Kim H, Shin DS. Genesis and role of wear debris in sliding wear of ceramics. *Wear.* 2000;245(1-2):53-60.
25. Desa O, Bahadur S. The effect of lubricants in single point scratching and abrasive machining of alumina and silicon nitride. *Wear.* 2001;251(1-12):1085-93.
26. Zhang YF, Zheng J, Zheng L, Zhou ZR. Effect of adsorption time on the adhesion strength between salivary pellicle and human tooth enamel. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2015;42:257-66.
27. Sajewicz E. Effect of saliva viscosity on tribological behaviour of tooth enamel. *Tribo Int.* 2009;42(2):327-32.
28. Dawes C. Salivary flow patterns and the health of hard and soft oral tissues. *J Am Dent Assoc.* 2008;139 Suppl:18S-24S.
29. Dugmore CR, Rock WP. The prevalence of tooth erosion in 12-year-old children. *Br Dent J.* 2004;196(5):279-82; discussion 73.
30. Fares J, Shirodaria S, Chiu K, Ahmad N, Sherriff M, Bartlett D. A new index of tooth wear. Reproducibility and application to a sample of 18- to 30-year-old university students. *Caries Res.* 2009;43(2):119-25.
31. Van't Spijker A, Rodriguez JM, Kreulen CM, Bronkhorst EM, Bartlett DW, Creugers NH. Prevalence of tooth wear in adults. *Int J Prosthodont.* 2009;22(1):35-42.
32. Van 't Spijker A, Kreulen CM, Creugers NH. Attrition, occlusion, (dys)function, and intervention: a systematic review. *Clin Oral Implants Res.* 2007;18 Suppl 3:117-26.
33. Zum Gahr K-H. Microstructure and wear of materials. Tribology series 10 ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.; 1987.

34. Kohyama K, Hatakeyama E, Sasaki T, Dan H, Azuma T, Karita K. Effects of sample hardness on human chewing force: a model study using silicone rubber. *Arch Oral Biol.* 2004;49(10):805-16.
35. Blau P. Embedding Wear Models into Friction Models. *Tribol Lett.* 2009;34(1):75-9.
36. Blau P. The significance and use of the friction coefficient. *Tribo Int.* 2001;34(9):585-91.
37. ASTM. American Standard for Testing Materials. G40-01 - Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. Annual Book of Standards. Philadelphia 2001.
38. Bushan B. Modern tribology handbook: principles of tribology. Boca Raton: CRC Press LLC; 2001.
39. ASM. American Society for Metals Handbook: Friction, Lubrication and wear technology: ASM International; 1992.
40. Gant AJ, Gee MG. A review of micro-scale abrasion testing. *J Pys D: Appl Phys.* 2011;44(7):073001 (15pp).
41. Bhatka R, Throckmorton GS, Wintergerst AM, Hutchins B, Buschang PH. Bolus size and unilateral chewing cycle kinematics. *Arch Oral Biol.* 2004;49(7):559-66.
42. Zhang YF, Zheng J, Zheng L, Shi XY, Qian LM, Zhou ZR. Effect of adsorption time on the lubricating properties of the salivary pellicle on human tooth enamel. *Wear.* 2013;301(1-2):300-7.
43. Warde P, Kroll B, O'Sullivan B, Aslanidis J, Tew-George E, Waldron J, et al. A phase II study of Biotene in the treatment of postradiation xerostomia in patients with head and neck cancer. *Support Care Cancer.* 2000;8(3):203-8.
44. Meyer-Lueckel H, Schulte-Monting J, Kielbassa AM. The effect of commercially available saliva substitutes on predemineralized bovine dentin in vitro. *Oral Dis.* 2002;8(4):192-98.
45. Tantbirojn D, Huang A, Ericson MD, Poolthong S. Change in surface hardness of enamel by a cola drink and a CPP-ACP paste. *J Dent.* 2008;36(1):74-9.

46. Eisenburger M, Addy M. Erosion and attrition of human enamel in vitro part II: influence of time and loading. *J Dent*. 2002;30(7-8):349-52.
47. Eisenburger M, Addy M. Erosion and attrition of human enamel in vitro part I: interaction effects. *J Dent*. 2002;30(7-8):341-7.
48. Kaidonis JA, Richards LC, Townsend GC, Tansley GD. Wear of human enamel: a quantitative in vitro assessment. *J Dent Res*. 1998;77(12):1983-90.
49. Sanches RP, Otani C, Damiao AJ, Miyakawa W. AFM characterization of bovine enamel and dentine after acid-etching. *Micron*. 2009;40(4):502-6.
50. Guidoni G, Swain M, Jager I. Enamel: From brittle to ductile like tribological response. *J Dent*. 2008;36(10):786-94.
51. Arsecularatne JA, Hoffman M. On the wear mechanism of human dental enamel. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2010;3(4):347-56.
52. Xie ZH, Swain MV, Swadener G, Munroe P, Hoffman M. Effect of microstructure upon elastic behaviour of human tooth enamel. *J Biomech*. 2009;42(8):1075-80.
53. Hayashi-Sakai S, Sakai J, Sakamoto M, Endo H. Determination of fracture toughness of human permanent and primary enamel using an indentation microfracture method. *J Mater Sci Mater Med*. 2012;23(9):2047-54.
54. He LH, Yin ZH, van Vuuren LJ, Carter EA, Liang XW. A natural functionally graded biocomposite coating--human enamel. *Acta Biomater*. 2013;9(5):6330-7.
55. He LH, Swain MV. Enamel--a functionally graded natural coating. *J Dent*. 2009;37(8):596-603.
56. Zheng J, Zhou ZR, Zhang J, Li H, Yu HY. On the friction and wear behaviour of human tooth enamel and dentin. *Wear*. 2003;255(7-12):967-74.
57. Sakar-Deliormanli A, Guden M. Microhardness and fracture toughness of dental materials by indentation method. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2006;76(2):257-64.

58. Arsecularatne JA, Hoffman M. Ceramic-like wear behaviour of human dental enamel. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2012;8:47-57.
59. Evans AG, Marshall DB. Wear mechanism in ceramics, fundamentals of friction and wear of materials. ASM. 1980:439-52.
60. Lawn B. Fracture of brittle solids. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press; 1993. 378 p.
61. Guidoni GM, Swain MV, Jager I. Wear behaviour of dental enamel at the nanoscale with a sharp and blunt indenter tip. *Wear*. 2009;266(1-2):60-8.
62. Sajewicz E. Tribological behaviour of human enamel in red wine and apple juice environments. *Wear*. 2007;262(3-4):308-15.
63. Zheng J, Zhou ZR. Friction and wear behavior of human teeth under various wear conditions. *Tribol Int*. 2007;40(2):278-84.
64. Zheng L, Li Y, Zheng J, Wen M, Zhang TF, Qian LM, et al. A comparative study on the sliding wear behaviors of human tooth enamel, Cu–Zn alloy and Al₂O₃ ceramic. *Wear*. 2013;301(1-2):308-15.
65. Yassen GH, Platt JA, Hara AT. Bovine teeth as substitute for human teeth in dental research: a review of literature. *J Oral Sci*. 2011;53(3):273-82.
66. Wang L, Tang R, Bonstein T, Orme CA, Bush PJ, Nancollas GH. A new model for nanoscale enamel dissolution. *J Phys Chem B*. 2005;109(2):999-1005.
67. Johnson WM, Rapoff AJ. Microindentation in bone: hardness variation with five independent variables. *J Mater Sci Mater Med*. 2007;18(4):591-7.
68. Pinto MM, Cesar PF, Rosa V, Yoshimura HN. Influence of pH on slow crack growth of dental porcelains. *Dent Mater*. 2008;24(6):814-23.
69. Biotène [internet homepage]. [access in 2014 Oct. 10]. Available from: <http://www.biotene.com/products/gel>.

70. Neill DJ, Kydd WL, Nairn RI, Wilson J. Functional loading of the dentition during mastication. *J Prosthet Dent.* 1989;62(2):218-28.

ANEXO A – Parecer do Comitê de Ética no Uso de Animais

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ODONTOLOGIA**

Comissão de Ética no Uso de Animais/CEUA
Tel. (11) 3091 7842

CERTIFICADO

Certificamos que o Protocolo CEUA/FOUSP N° 002/2015 referente ao projeto intitulado: **"Desgaste por atrição (deslizamento) em esmalte bovino em função da carga e da lubrificação"** sob a responsabilidade de execução dos autores **Prof. Dr. Rafael Yagüe Ballester**, e da aluna **Priscilla Pessin Coppo**, foi analisado na presente data e considerado isento de análise da CEUA por utilizar dentes bovinos provenientes de frigoríficos.

São Paulo, 23 de fevereiro de 2015.

Prof. Dr. Víctor Elías Arana-Chavez
Presidente da CEUA/FOUSP

ANEXO B – Parecer do Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos

PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP**DADOS DO PROJETO DE PESQUISA**

Título da Pesquisa: Desgaste por atrição (deslizamento) em esmalte bovino em função da carga e da lubrificação

Pesquisador: Priscilla Pessin Coppo

Área Temática:

Versão: 1

CAAE: 39189514.0.0000.0075

Instituição Proponente: Universidade de São Paulo

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 919.059

Data da Relatoria: 16/12/2014

Apresentação do Projeto:

O desgaste é a perda superficial de matéria dos tecidos duros dentais causada por fatores mecânicos e/ou químicos, excluindo-se cáries e traumas. É considerado um problema prevalente em crianças, adolescentes e adultos (1-3). Em adultos de 18-30 anos, é comum a presença de algum grau de desgaste no esmalte, que chega à exposição de dentina em 5,3% das superfícies dentais desgastadas (4). O desgaste dental aumenta com a idade devido ao uso funcional, mas ainda há informações insuficientes para explicar quando o aumento do desgaste é resultado de fatores específicos, como dieta ou hábitos parafuncionais, ou reflete os processos de envelhecimento (5). Se não controlado, o desgaste dental pode resultar em prejuízo da função mastigatória e em diminuição da qualidade de vida (6). Com o aumento da expectativa de vida da população, a diminuição dos índices de cárie e a manutenção dos dentes naturais por períodos mais longos, o estudo do desgaste dental se tornou uma área de interesse crescente, tanto para uma abordagem restauradora (como e com que materiais restaurar os tecidos dentais perdidos), quanto preventiva (quais são os mecanismos de desgaste e como evitar ou interromper seu progresso).

A proposta é de se investigar o desgaste por deslizamento de

Endereço: Av Prof Lineu Prestes 2227
Bairro: Cidade Universitária **CEP:** 05.508-900
UF: SP **Município:** SÃO PAULO
Telefone: (11)3091-7960 **Fax:** (11)3091-7814 **E-mail:** cepfo@usp.br

FACULDADE DE
ODONTOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO

Continuação do Parecer: 919.099

pares conformes (superfícies deslizantes planas) de esmalte incisal dental. As superfícies de esmalte submetidas ao desgaste serão caracterizadas quanto a seus valores de microdureza Vickers e de tenacidade à fratura. Serão correlacionados os regimes de desgaste às variações de carga aplicada e lubrificação do meio (sem lubrificação, saliva artificial, natural ou lubrificante oral).

Objetivo da Pesquisa:

Distinguir as condições de ensaio que propiciam os mecanismos de desgaste moderado daquelas que propiciam os de desgaste severo em pares de esmalte de semelhantes dureza e tenacidade à fratura:

- que valores de carga aplicada deflagram mecanismos moderados ou severos?
- como influenciam as medidas de dureza e de tenacidade à fratura na resistência ao desgaste?
- a presença de saliva artificial, humana ou de um lubrificante oral podem causar a transição dos mecanismos de desgaste, mesmo mantidos os demais parâmetros?
- que lubrificante (saliva artificial, humana ou lubrificante oral) pode ser mais eficaz em reduzir a taxa de desgaste?

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

RISCOS E DESCONFORTOS ESPERADOS

Durante exame clínico inicial: pode haver algum desconforto durante a sondagem para avaliação periodontal (da gengiva).

Durante a coleta de saliva: pode haver algum desconforto muscular causado pela mastigação do filme plástico, como fadiga muscular. Caso isso ocorra, o indivíduo receberá orientações fisioterápicas para alívio e remissão da dor ou desconforto imediatamente após o aparecimento da dor/desconforto, mesmo que a coleta não tenha sido finalizada.

É assegurado ao participante a assistência imediata e tratamento odontológico adequado no caso da ocorrência de qualquer complicação.

BENEFÍCIOS

Esse tipo de pesquisa tem fundamental importância para o meio científico pois irá contribuir para o entendimento do fenômeno do desgaste dental, que hoje é de alta prevalência (muito comum e frequentemente encontrado) em indivíduos de todas as idades e pode causar desconforto, estética ruim e perda de qualidade de vida. Como

Endereço: Av Prof Lineu Prestes 2227

Bairro: Cidade Universitária

CEP: 05.508-900

UF: SP

Município: SÃO PAULO

Telefone: (11)3091-7960

Fax: (11)3091-7814

E-mail: cepfo@usp.br

FACULDADE DE
ODONTOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO

Continuação do Parecer: 919.059

ainda não há um meio de prevenir o desgaste ou um protocolo restaurador estabelecido para restaurar dentes desgastados, o entendimento do modo como os tecidos dentais (camadas dos dentes) são perdidos durante o desgaste irá auxiliar no desenvolvimento de métodos efetivos de prevenção e restauração de dentes.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Trabalho simples, bem delineado e de resultados importantes.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Apresentados o projeto; TCLE para a saliva da própria pesquisadora; e, Folha de Rosto.

Recomendações:

Tendo em vista a legislação vigente, devem ser encaminhados ao CEP-FOUSP relatórios parciais anuais referentes ao andamento da pesquisa e relatório final, utilizando-se da opção "Enviar Notificação" (descrita no Manual "Submeter Notificação", disponível na Central de Suporte - canto superior direito do site www.saude.gov.br/plataformabrasil).

Qualquer alteração no projeto original deve ser apresentada "emenda" a este CEP, de forma objetiva e com justificativas para nova apreciação.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Não há pendências.

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

Considerações Finais a critério do CEP:

SAO PAULO, 17 de Dezembro de 2014

Assinado por:
Maria Gabriela Hays Blazevic
(Coordenador)

Endereço: Av Prof Lineu Prestes 2227

Bairro: Cidade Universitária

CEP: 05.508-900

UF: SP

Município: SAO PAULO

Telefone: (11)3091-7960

Fax: (11)3091-7814

E-mail: cepfo@usp.br