

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), o texto completo desse trabalho será disponibilizado no repositório a partir de 19/09/2027.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

ANA CAROLINA DA SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, MICROBIOLÓGICO E
DA VIDA EM FADIGA DE PILARES DE ZIRCÔNIA COM VIDRO DE
PRATA**

ANA CAROLINA DA SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, MICROBIOLÓGICO E DA VIDA
EM FADIGA DE PILARES DE ZIRCÔNIA COM VIDRO DE PRATA**

Tese apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de São José dos Campos, como parte dos requisitos para obtenção do título de DOUTOR(A), pelo Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS APLICADAS À SAÚDE BUCAL.

Área: Prótese dentária. Linha de pesquisa: Desempenho de materiais reabilitadores protéticos.

Orientadora: Profa. Dra. Renata Marques de Melo Marinho

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Moreira Bastos Campos

São José dos Campos

2025

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação
[acesso em 2025]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Silva, Ana Carolina da

Análise do comportamento mecânico, microbiológico e da vida em fadiga de pilares de zircônia com vidro de prata / Ana Carolina da Silva. - São José dos Campos : [s.n.], 2025.
139 f. : il.

Tese (doutorado) - Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde Bucal - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2025.

Orientadora: Renata Marques de Melo Marinho

Coorientadora: Tiago Moreira Bastos Campos

1. Biofilme . 2. Implante dentário. 3. Prata. 4. Testes mecânicos. I. Marinho, Renata Marques de Melo, orient. II. Campos, Tiago Moreira Bastos, coorient. III. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. V. Universidade Estadual Paulista (UNESP). VI. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Os vidros soda-cal dopados com boro, com ou sem prata, representam uma inovação promissora para a odontologia restauradora. Eles combinam desempenho mecânico compatível com a zircônia, estabilidade óptica e atividade antimicrobiana. Essa tríade é clinicamente relevante, uma vez que permite aplicação segura sobre zircônias de alta translucidez sem comprometer a resistência à fadiga, reduz o desgaste do dente antagonista e preserva a função mastigatória e o conforto do paciente a longo prazo. A ação antimicrobiana, eficaz contra bactérias gram-positivas, gram-negativas e fungos, amplia a proteção contra a colonização de biofilme, benefício essencial para pacientes com histórico de cárie recorrente, peri-implantite ou doenças periodontais. No campo tecnológico, o ajuste do coeficiente de expansão térmica e da microestrutura do vidro garante compatibilidade ideal com a zircônia, evitando tensões residuais e falhas precoces. Esses revestimentos sinalizam uma nova geração de restaurações cerâmicas que unem estética, durabilidade e proteção biológica, com alto potencial de aplicação clínica em cenários desafiadores de acúmulo de biofilme.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Boron-doped soda-lime glasses, with or without silver, represent a promising innovation in restorative dentistry. They combine mechanical performance compatible with zirconia, optical stability, and antimicrobial activity. This triad is clinically relevant, as it enables safe application over high-translucency zirconia without compromising fatigue resistance, reduces wear on the opposing tooth, and preserves masticatory function and patient comfort in the long term. The antimicrobial action, effective against gram-positive bacteria, gram-negative bacteria, and fungi, enhances protection against biofilm colonization, an essential benefit for patients with a history of recurrent caries, peri-implantitis, or periodontal disease. From a technological perspective, tailoring the thermal expansion coefficient and the glass microstructure ensures ideal compatibility with zirconia, preventing residual stress and early failures. These coatings signal a new generation of ceramic restorations that integrate aesthetics, durability, and biological protection, with strong potential for clinical application in challenging scenarios prone to biofilm accumulation.

BANCA EXAMINADORA

Pesq III. Dra. Renata Marques de Melo Marinho (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Tiago Moreira Bastos Campos (Coorientador)

Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

Faculdade de Odontologia

Campus de Pelotas

Profa. Dra. Nathalia de Carvalho Ramos Ribeiro

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Marco Antonio Bottino

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Estevam Augusto Bonfante

Universidade de São Paulo (USP)

Departamento de Prótese e Periodontia

Campus de Bauru

Prof. Dr. Paulo Francisco Cesar

Universidade de São Paulo (USP)

Departamento de Biomateriais e Biologia Oral

Campus de São Paulo

São José dos Campos, 19 de setembro de 2025.

DEDICATÓRIA

Eu dedico este trabalho aos meus pais Edjane e Antônio, meu esposo Aaron, meu irmão Anderson e minha avó Maria Elza que foram essenciais na construção de quem sou e de tudo o que tenho hoje. Eu agradeço à Deus por ter me dado uma família maravilhosa que me encoraja a ser melhor a cada dia que passa e suporta todos os meus sonhos. Sou imensamente abençoada por tê-los em minha vida. A vocês ofereço esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar eu agradeço à Deus, pois sem Ele eu não seria capaz de chegar e conquistar tudo o que sou e tenho hoje. Graças à Ele tenho uma família que sempre me motiva a conquistar meus sonhos e a alcançar minhas vitórias.

Agradeço novamente aos meus pais, ao meu irmão, meu esposo e minha avó por todo apoio, paciência e companheirismo. Que acompanharam lado a lado todas as minhas dificuldades e também as alegrias durante este processo. Vocês foram fundamentais para que essa etapa da minha vida tenha se concluído com sucesso. Sou extremamente grata pela vida de vocês.

Ao meu coorientador Dr. Tiago Bastos Campos, que a todo momento esteve ao meu lado, me auxiliando em cada dificuldade e obstáculo, motivando e me fazendo acreditar que eu poderia alcançar os voos mais altos que até eu mesma imaginei que não fosse possível. Obrigada pelo apoio, dedicação e principalmente pela paciência durante esses 7 anos de parceria.

À minha orientadora Dra. Renata Marques de Melo Marinho por todo suporte, paciência, dedicação, pelos conhecimentos transmitidos e por acreditar no meu potencial desde o início.

Aos meus queridos amigos de pós-graduação, em especial Juliana Freitas, Amir Demachkia, Karina Barbosa, Elisa Aboucauch, Amanda Ribeiro, Tatiana Cursino e Beatriz Serralheiro por ter convivido comigo lado a lado nesta etapa tão importante de nossas vidas. Pelo companheirismo, dedicação e cumplicidade. Tenho certeza de que nossa amizade será da pós-graduação para vida.

Aos demais amigos da pós-graduação, obrigada por toda ajuda e convívio durante o curso. Levarei cada um para sempre comigo.

Ao professor Dr. Estevam Bonfante, Dra. Larissa Alves e Dr. Ernesto Benalcázar pela parceria maravilhosa e por terem me acolhido tão bem no CraniumLab, auxiliando e apoiando no teste de fadiga. Que Deus os abençoe e traga muitas felicidades para a vida de vocês.

Ao Professor Dr. Jason Griggs, por me acolher não apenas durante o período de estágio na University of Mississippi Medical Center (UMMC), mas também após a conclusão do estágio. Sua paciência, humildade e sabedoria não apenas me motivam, mas também me servem como exemplo de excelência profissional e humana, inspirando-me a trilhar e perseverar na vida acadêmica com dedicação e propósito.

À professora Dra. Susana Salazar, aos amigos/alunos do grupo Biomedical Materials Science e funcionários da UMMC, em especial Ryia, Aditya, Laura e Kartikeya por me ajudarem a tornar essa jornada desafiadora do estágio no exterior mais leve, com sua amizade e carinho. Vocês são anjos na Terra.

À minha família americana Arilma e Kevin que também me acolheram como família durante um ano. Vocês me ajudaram a suportar a saudade durante todo esse tempo longe dos que mais amo. Que Deus retribua infinitamente mais bençãos e alegrias na vida de vocês.

Ao professor titular Dr. Marco Antônio Bottino, por acreditar em meu potencial e me encorajar a alcançar meus objetivos, pelos ensinamentos e pela confiança depositada em mim.

Aos professores Dra. Nathalia Ramos que desde o início me apoiou e incentivou, dividindo a posição de professora/amiga, e ao Dr. Paulo César por aceitar participar dessa banca e por contribuírem na minha experiência profissional.

A todos os professores do Programa de pós-graduação em Ciências Aplicadas à Saúde Bucal (CASB), por terem contribuído em minha formação acadêmica e científica.

A todos os funcionários da Unesp (São José dos Campos), em especial, aos funcionários do Departamento de Materiais Odontológicos e Prótese.

Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em nome do Dr. Tiago Bastos Campos pelo grande auxílio na execução de alguns testes deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) pela concessão da bolsa de Doutorado, através do Processo nº 2021/03878-3, no período de 01/08/2021 a 31/03/2026 e pela Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior

(BEPE), através do Processo nº 2023/03271-7 no período de 21/09/2023 a 20/09/2024.

À professora Juliana Junqueira pelo auxílio na execução dos testes microbiológicos, assim como ao laboratório de microbiologia do ICT-Unesp/São José dos Campos.

À empresa Implacil Osstem pela doação dos implantes e componentes protéticos. Muito obrigada pelo apoio e por tornar possível a execução desta tese.

E por fim, a todos que indiretamente estiveram comigo e colaboraram para que esta etapa da minha vida profissional tenha caminhado com êxito. Muito obrigada a todos.

"Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e o mais ele fará." Salmos 37:5

RESUMO

Silva ACS. Análise do comportamento mecânico, microbiológico e da vida em fadiga de pilares de zircônia com vidro de prata [tese]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2025.

Avaliar as propriedades mecânicas, antimicrobianas e ópticas de revestimentos de vidro soda-cal com boro com e sem dopagem de prata em zircônias 3Y-TZP e 5Y-PSZ. Esta tese foi dividida em três estudos (2.1; 2.2 e 2.3). No estudo 2.1, amostras em formato de discos ($\varnothing$: 12 mm; espessura 1.2 mm) e quadrados (4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 1.6 mm) de 3Y-TZP e 5Y-PSZ foram divididas em: sinterizadas (3Y-C e 5Y-C), revestidas com glaze comercial (3Y-G e 5Y-G), com vidro soda-cal (3Y-SL e 5Y-SL) e com vidro soda-cal contendo prata (3Y-SLAg e 5Y-SLAg). Foram realizados os testes de citotoxicidade (ensaio MTT), resistência à flexão biaxial (σ_B), difração de raios X (DRX), translucidez (TP_{00}), diferença de cor (ΔE_{00}) e rugosidade (R_a e R_z). A formação de biofilme foi quantificada pela contagem de unidades formadoras de colônia (UFC/mL) de *C. albicans*, *S. sanguinis* e *E. coli*. Foram realizadas microscopia eletrônica de varredura (MEV) e fractografia. Espectroscopia por energia dispersiva (EDS) foi realizada nas amostras SL e SLAg. O módulo de Weibull (m) e a resistência característica (σ_0) para a resistência à flexão biaxial (IC 95%) foram calculados. Todos os dados foram analisados por ANOVA de dois fatores e método de Dunn, enquanto o teste de UFC foi analisado por ANOVA de um fator ($\alpha = 0,05$). Os vidros experimentais não induziram efeitos citotóxicos. A resistência à flexão dos grupos 3Y-TZP apresentou os maiores valores. Os difractogramas mostraram fases tetragonal e cúbica em todos os grupos. Valores de translucidez mais altos foram observados para os grupos 5Y-PSZ, enquanto os valores de ΔE_{00} foram semelhantes. Os grupos SL e SLAg exibiram os menores valores de rugosidade (R_a) para ambas as zircônias. O grupo 5Y-SL apresentou efeitos antimicrobianos contra todos os micro-organismos testados, enquanto o grupo 5Y-SLAg apresentou efeito antimicrobiano apenas contra *E. coli*. As fraturas tiveram origem na superfície da zircônia, enquanto para o grupo 5Y-G, a origem foi na camada de glaze. As micrografias por MEV revelaram cristais em forma de flor para os grupos 3Y-SL, 5Y-SL e 5Y-SLAg. A análise por EDS identificou zircônio na composição dos cristais. Para o estudo 2.2, quarenta e cinco coroas de incisivo central superior de zircônia 5Y-PSZ foram divididas em três grupos: glaze comercial (G); vidro soda-lime dopado com boro (BSL); e vidro soda-lime dopado com boro e prata (BSLAg). Foi realizado ensaio de fadiga acelerado (SSALT). A vida característica e o módulo de Weibull foram estimados utilizando o software ALTAPRO. Análise por EDS, rugosidade superficial (SR , S_a e S_z) das coroas revestidas e dos pistões, fractografia e avaliação do desgaste dos pistões foram avaliados. A rugosidade das coroas e o desgaste dos pistões foram analisados por ANOVA de duas vias e teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). A rugosidade dos pistões foi avaliada por modelo linear misto (LMM) ($\alpha = 0,05$). A análise de EDS identificou zircônio na composição das estruturas radiopacas dos vidros experimentais. As coroas revestidas com BSL apresentaram os menores valores de S_z em todos os perfis de fadiga. Após o ensaio de fadiga, a rugosidade (S_a e S_z) dos pistões foi semelhante entre os grupos, e maior que antes do ensaio. Não houve diferença significativa entre os grupos na

análise de vida em fadiga. As fraturas se originaram na superfície do vidro em todos os grupos. Os pistões em contato com coroas do grupo G apresentaram maior desgaste volumétrico no perfil de fadiga leve (*mild*). No estudo 2.3, cinquenta e sete coroas de incisivo central superior e pilares personalizados de zircônia 5Y-PSZ produzidos por CAD/CAM foram divididos em três grupos: controle (C), vidro soda-cal dopado com boro (BSL) e vidro soda-cal dopado com boro e prata (BSLAg). A infiltração microbiana na interface implante-pilar foi quantificada por UFC/mL para *C. albicans*, *S. sanguinis* e *E. coli*. O teste de fadiga (SSALT) foi realizado, a probabilidade de sobrevivência e os parâmetros de Weibull foram estimados com o software ALTA PRO. Foram realizadas análises MEV e fractografia. Os resultados de UFC foram analisados por ANOVA de uma via ($\alpha = 0,05$). O grupo BSL reduziu significativamente a infiltração microbiana para todos os microrganismos testados ($p < 0,05$), enquanto o grupo BSLAg não apresentou efeito antimicrobiano. Consequentemente, apenas os grupos C e BSL foram submetidos ao ensaio de fadiga. Embora o grupo controle tenha apresentado maior probabilidade de sobrevivência (%), o grupo BSL exibiu valor de beta mais elevado ($\beta = 1,05$ vs. $0,57$). Micrografias de MEV do grupo BSL revelaram menor adesão microbiana. As fraturas se originaram predominantemente na base de titânio em todos os grupos. Os resultados integrados demonstram que o revestimento com vidro soda-cal dopado com boro (SL/BSL) é citocompatível, preserva as propriedades mecânicas e ópticas das zircônias 3Y-TZP e 5Y-PSZ, e apresenta efeito antimicrobiano superior ao da formulação com prata (SLAg/BSLAg). Em coroas de 5Y-PSZ, esses revestimentos mantiveram o desempenho em fadiga e reduziram significativamente o desgaste do antagonista, enquanto, em pilares de zircônia 5Y-PSZ implantossuportados, o vidro BSL ofereceu novamente efeito antimicrobiano, preservando a resistência à fadiga. Tais evidências apontam para o potencial clínico do vidro soda-cal dopado com boro como alternativa multifuncional capaz de aliar estabilidade mecânica, controle microbiológico e menor abrasividade, favorecendo a longevidade de restaurações cerâmicas e próteses sobre implantes, especialmente em áreas suscetíveis ao acúmulo de biofilme e ao desenvolvimento de peri-implantite.

Palavras-chave: biofilme; implante dentário; prata; testes mecânicos.

ABSTRACT

Silva ACS. *Analysis of the mechanical and microbiological behavior and fatigue life of zirconia abutments with silver-containing glass [doctorate thesis]*. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Institute of Science and Technology; 2025.

To evaluate the mechanical, antimicrobial, and optical properties of boron-containing soda–lime glass coatings, with and without silver doping, applied to 3Y-TZP and 5Y-PSZ zirconias. This thesis was divided into three studies (2.1, 2.2, and 2.3). In study 2.1, disc-shaped ($\varnothing$: 12 mm; thickness: 1.2 mm) and square-shaped (4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 1.6 mm) samples of 3Y-TZP and 5Y-PSZ were divided into the following groups: sintered (3Y-C and 5Y-C), commercial glaze-coated (3Y-G and 5Y-G), soda–lime glass-coated (3Y-SL and 5Y-SL), and soda–lime glass with silver-coated (3Y-SLAg and 5Y-SLAg). The following tests were performed: cytotoxicity (MTT assay), biaxial flexural strength (σ_B), X-ray diffraction (XRD), translucency (TP00), color difference (ΔE_{00}), and surface roughness (R_a and R_z). Biofilm formation was quantified by counting colony-forming units (CFU/mL) of *C. albicans*, *S. sanguinis*, and *E. coli*. Scanning electron microscopy (SEM) and fractography were conducted. Energy-dispersive spectroscopy (EDS) was performed on SL and SLAg samples. The Weibull modulus (m) and characteristic strength (σ_0) for biaxial flexural strength (95% CI) were calculated. All data were analyzed by two-way ANOVA and Dunn's method, while CFU tests were analyzed by one-way ANOVA ($\alpha = 0.05$). The experimental glasses did not induce cytotoxic effects. Flexural strength values were higher for the 3Y-TZP groups. XRD patterns showed tetragonal and cubic phases in all groups. Higher translucency values were observed for the 5Y-PSZ groups, while ΔE_{00} values were similar. SL and SLAg groups exhibited the lowest R_a roughness values for both zirconias. The 5Y-SL group showed antimicrobial effects against all tested microorganisms, while 5Y-SLAg exhibited antimicrobial activity only against *E. coli*. Fractures originated on the zirconia surface, except for the 5Y-G group, in which fractures started in the glaze layer. SEM micrographs revealed flower-shaped crystals in 3Y-SL, 5Y-SL, and 5Y-SLAg groups. EDS analysis identified zirconium in the crystal composition. In study 2.2, forty-five maxillary central incisor crowns of 5Y-PSZ zirconia were divided into three groups: commercial glaze (G), boron-doped soda–lime glass (BSL), and boron-doped soda–lime glass with silver (BSLAg). Step-stress accelerated life testing (SSALT) was performed. The characteristic lifetime and Weibull modulus were estimated using ALTAPRO software. EDS analysis, surface roughness (SR , S_a , and S_z) of the coated crowns and pistons, fractography, and piston wear assessment were conducted. Crown SR and piston wear were analyzed using two-way ANOVA and Tukey's test ($\alpha = 0.05$). Piston SR was evaluated by linear mixed model (LMM) ($\alpha = 0.05$). EDS analysis identified zirconium in the composition of radiopaque structures in the experimental glasses. BSL-coated crowns showed the lowest S_z values across all fatigue profiles. After fatigue testing, piston roughness (S_a and S_z) was similar among groups and higher than before testing. No significant difference was found between groups in fatigue lifetime analysis. Fractures originated at the glass surface in all groups. Pistons in contact with G group crowns showed greater volumetric wear under

the mild fatigue profile. In study 2.3, fifty-seven maxillary central incisor crowns and custom CAD/CAM 5Y-PSZ zirconia abutments were divided into three groups: control (C), boron-doped soda–lime glass (BSL), and boron-doped soda–lime glass with silver (BSLAg). Microbial leakage at the implant–abutment interface was quantified by CFU/mL for C. albicans, S. sanguinis, and E. coli. Fatigue testing (SSALT) was performed, and survival probability and Weibull parameters were estimated using ALTA PRO software. SEM and fractographic analyses were conducted. CFU results were analyzed by one-way ANOVA ($\alpha = 0.05$). The BSL group significantly reduced microbial leakage for all tested microorganisms ($p < 0.05$), whereas the BSLAg group showed no antimicrobial effect. Consequently, only C and BSL groups underwent fatigue testing. While the control group showed a higher survival probability (%), the BSL group exhibited a higher beta value ($\beta = 1.05$ vs. 0.57). SEM micrographs of the BSL group revealed reduced microbial adhesion. Fractures originated predominantly from bending at the titanium base in all groups. The integrated results demonstrate that boron-doped soda–lime glass (SL/BSL) is cytocompatible, preserves the mechanical and optical properties of both 3Y-TZP and 5Y-PSZ zirconias, and exhibits superior antimicrobial effects compared to the silver-containing formulation (SLAg/BSLAg). In 5Y-PSZ crowns, these coatings maintained fatigue performance and significantly reduced antagonist wear, while in implant-supported 5Y-PSZ zirconia abutments, BSL glass again provided antimicrobial effects while preserving fatigue resistance. Collectively, these findings indicate the clinical potential of boron-doped soda–lime glass as a multifunctional alternative capable of combining mechanical stability, microbiological control, and reduced abrasiveness, thereby enhancing the longevity of ceramic restorations and implant-supported prostheses, particularly in areas prone to biofilm accumulation and peri-implantitis development.

Keywords: biofilm; dental implant; silver; mechanical testing.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 ARTIGO(S).....	19
2.1 Artigo – Silva AC, Silva JFG, Rodrigues CS, Santos ELS, Junqueira JC, Campos TMB, Thim GP, Jodha KS, Salazar Marocho SM, Griggs JA, Melo RMM. Desvendando os mecanismos antimicrobianos e o desempenho multifuncional de revestimentos de vidro dopado com boro em zircônias odontológicas / <i>Unraveling the antimicrobial mechanisms and multifunctional performance of boron-doped glass coatings on dental zirconias</i>.....	19
2.2 Artigo – Silva AC, Silva JFG, Campos TMB, Thim GP, Jodha KS, Salazar Marocho SM, Melo RMM, Griggs JA. Coroas de Zircônia Ultratranslúcidas com Revestimentos de Vidro Antimicrobiano: Análise da Vida em Fadiga e do Desgaste do Antagonista / <i>Ultra-Translucent Zirconia Crowns with Antimicrobial Glass Coatings: Fatigue Life and Antagonist Wear Analysis</i>..	62
2.3 Artigo – Silva AC, Alves LMM, Benalcázar Jalk EB, Junqueira JC, Campos TMB, Bottino MA, GP, Griggs JA, Bonfante EA, Melo RMM. Coroas de zircônia desempenho à fadiga e inibição microbiana na interface implante-pilar de pilares de zircônia revestidos com vidro experimental/ <i>Fatigue performance and microbial inhibition at the implant-abutment interface of zirconia abutments coated with experimental glass</i>	100
3 CONSIDERAÇÕES GERAIS	135
REFERÊNCIAS.....	136
ANEXOS	140

1 INTRODUÇÃO

Dentre as diversas possibilidades reabilitadoras desenvolvidas na Odontologia, a implantodontia se destacou desde o estabelecimento dos conceitos de osseointegração por Branemark. A evolução dessa técnica resultou em variações dimensionais e geométricas de implantes e pilares, visando atender a diferentes demandas clínicas (Lopes et al., 2010).

A conexão entre o pilar e o implante pode originar uma microfenda na interface, favorecida por cargas mastigatórias, forças laterais e torque inadequado (Steinebrunner et al., 2005; Persson et al., 1996; Gross et al., 1999). Segundo Vidigal (1995), essa desadaptação pode variar de 20 µm a 150 µm em implantes com conexão hexagonal externa. Estudos demonstram que esta microfenda constitui um ambiente propício à colonização bacteriana, comprometendo o selamento mucoso peri-implantar (Buser et al., 1990; O'Mahony et al., 2000). Furst et al. (2007) relataram que a colonização bacteriana na interface pilar/implante pode ocorrer em até 30 minutos após a instalação, evidenciando a necessidade de rigoroso controle do biofilme. A presença de microorganismos nesta região pode ocasionar odor e sabor desagradáveis (Persson et al., 1996; McCarthy, Guckes, 1993), além de levar à perda óssea peri-implantar por meio de um processo inflamatório denominado peri-implantite (Albrektsson et al., 1981; Vetromilla et al., 2019).

Entre os microrganismos associados à destruição dos tecidos peri-implantares, a *Escherichia coli* (bactéria gram-negativa), móvel e anaeróbia facultativa, tem sido frequentemente identificada e amplamente estudada no contexto de infecções por infiltração microbiana em implantes (Faria et al., 2011; Koutouzis et al., 2014). Além disso, *Candida albicans* (espécie fúngica) e *Streptococcus sanguinis* (bactéria gram-positiva) têm sido detectadas em biofilmes polimicrobianos formados sobre superfícies de titânio em indivíduos acometidos por doença peri-implantar (Souza et al., 2020).

Para mitigar essa falha biológica, diversas estratégias de vedação da interface pilar/implante foram propostas. McCarthy & Guckes (1993) aplicaram cimento temporário na região de acesso ao parafuso, porém, a infiltração

bacteriana persistiu a longo prazo. Resultados semelhantes foram encontrados por Duarte et al. (2006), que utilizaram um verniz à base de silício, com recorrência de contaminação após um mês. Como alternativa, conexões cone-morse foram introduzidas na implantodontia, proporcionando melhor vedação microbiológica devido ao contato íntimo entre as superfícies cônicas promovido por torque de fricção (Norton, 1997; Norton 1999). No entanto, apesar de reduzida, estudos apontam que implantes com plataforma cone morse ainda podem apresentar infiltração microbiana na interface pilar/implante (Baj et al., 2017; D'Ercole et al., 2023; Tripodi et al., 2012).

Os pilares híbridos, amplamente utilizados, consistem em uma estrutura de cerâmica cimentada sobre uma base de titânio, a qual é fixada ao implante por um parafuso de fixação. Além de permitir um perfil de emergência mais natural e cor gengival mais favorável, esses pilares oferecem desempenho mecânico confiável e elevada biocompatibilidade peri-implantar sendo indicado para regiões anteriores e posteriores (Ramos et al., 2018; Magne et al., 2011) (Figura 1).

Figura 1 – Esquema ilustrativo de implante do tipo cone morse e seus componentes protéticos



Fonte: Elaborado pelo autor

Durante a mastigação, forças cíclicas axiais e laterais podem induzir falhas por fadiga nos materiais protéticos, sendo estas associadas a diferentes tipos de tensões como tração, compressão, flexão e torção (Melo, 2015).

Para avaliar o desempenho mecânico de implantes e seus componentes, ensaios padronizados segundo a norma ISO 14801 são recomendados (Soares, Takamori, 2011). Nesse contexto, Cárdenas et al. (2021) analisaram a resistência à fadiga e o modo de falha de pilares de zircônia cimentados em bases de titânio, observando maior resistência às cargas cíclicas e número de ciclos em comparação a outros grupos. No entanto, as fraturas foram mais catastróficas, se estendendo até o parafuso protético. Tais achados indicam que, embora a resistência seja elevada, o modo de falha pode se tornar mais catastrófico. Sendo assim, acredita-se que o desenvolvimento e a aplicação de novos materiais odontológicos em pilares híbridos possam modificar o modo de falha das restaurações implanto-suportadas, mantendo a resistência mecânica desses pilares e, ao mesmo tempo, promovendo um potencial efeito antimicrobiano.

Dentro desta perspectiva, nosso grupo de pesquisa desenvolveu uma formulação de vidro soda-cal (ou vidro *soda-lime*) com finalidade antimicrobiana, aplicada sobre zircônia tetragonal estabilizada com 3 mol% de ítria (3Y-TZP) e zircônia parcialmente estabilizada por 5% mol de ítria (5Y-PSZ). Essa formulação foi previamente investigada (Silva et al., 2022; Ribeiro et al., 2022), porém seu coeficiente de expansão térmica (CTE: $15 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) mostrou-se incompatível com o da zircônia ($10,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) após cristalização, o que pode gerar tensões residuais de tração e prejudicar o desempenho mecânico (Kirsten et al., 2015; Silva et al., 2022). Como solução, foi desenvolvido uma nova formulação de vidro soda-cal dopada com boro, baseado nos estudos de López et al. (2022). A adição de boro reduz o número de oxigênios não ligantes na matriz vítrea, conferindo ao vidro borossilicato maior estabilidade térmica e menor CTE ($3,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), favorecendo a formação de tensões compressivas ao ser aplicado sobre a zircônia e, assim, melhorando o desempenho mecânico do conjunto (Rodrigues et al., 2024).

Além das propriedades mecânicas, esse vidro também apresentou efeito antimicrobiano contra *Streptococcus mutans*, *S. sanguinis*, *Candida albicans* e *Escherichia coli* (Sabino et al., 2022; Silva et al., 2025). Vidros soda-cal permitem a incorporação de íons, possibilitando ajustes químicos para aprimorar suas propriedades (Zanotto, Migliore, 1991; Silva et al., 2022). Considerando que

restaurações cerâmicas estão constantemente expostas ao ambiente bucal e à formação de biofilme, este estudo propôs a incorporação de íons prata à formulação dopada com boro desenvolvida por López-Esteban et al. (2014), visando potencializar seu efeito antimicrobiano.

A prata é amplamente reconhecida por sua ação antimicrobiana, sendo eficaz contra microrganismos eucariotas e compatível biologicamente quando utilizada em baixas concentrações. Estudos sugerem que íons de prata são capazes de inativar proteínas bacterianas (Sonai, 2008). Além disso, a incorporação de prata à zircônia não afetou a translucidez de zircônias 3Y-TZP e 5Y-PSZ, preservando suas propriedades ópticas essenciais (Silva et al., 2025).

Assim, com base na formulação de López et al. (2014), a nova composição de vidro soda-cal contendo prata metálica foi desenvolvida acompanhada de um protocolo de tratamento térmico específico para sua cristalização, visando melhorar a molhabilidade da superfície e obter um material homogêneo, esteticamente aceitável, livre de tensões residuais e com propriedades antimicrobianas.

Nossa hipótese é de que os vidros experimentais de soda-cal dopados com boro, com e sem prata, apresentem efeito antimicrobiano significativo contra os microrganismos testados (*C. albicans*, *S. sanguinis* e *E. coli*), sem comprometer as propriedades mecânicas e ópticas dos espécimes avaliados na Parte A (testes realizados em discos de zircônia) e na Parte B (testes em coroas e pilares de zircônia).

A relevância clínica desta pesquisa reside na possibilidade de redução dos casos de peri-implantite e falha dos implantes, uma vez que o vidro soda-cal dopado com boro, com e sem prata demonstrou efeito antimicrobiano significativo em estudos anteriores (Silva et al., 2022; Silva et al., 2025), mantendo, ainda, a translucidez da zircônia, uma inovação relevante para aplicações estéticas.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O revestimento com vidro soda-cal dopado com boro (SL ou BSL) demonstrou efeito antimicrobiano consistente contra diferentes microrganismos relevantes para a saúde peri-implantar (*Candida albicans*, *Streptococcus sanguinis* e *Escherichia coli*) quando aplicado sobre zircônia 5Y-PSZ. Entretanto, a adição de prata (SLAg ou BSLAg) neste vidro apenas promoveu efeito antimicrobiano contra *Escherichia coli* após 48 horas.

Tanto em discos quanto em coroas e pilares de zircônia, o vidro soda-cal manteve a resistência mecânica e o desempenho à fadiga, sendo semelhantes aos grupos controles (glaze ou zircônia sinterizada). Isso foi observado tanto em ensaios de flexão biaxial quanto em testes de fadiga de vida acelerada (SSALT).

Em coroas, os vidros soda-cal com e sem prata (BSL e o BSLAg) reduziram significativamente o desgaste do antagonista em comparação com o glaze comercial, sugerindo potencial para diminuir complicações clínicas relacionadas ao desgaste oclusal.

No contexto de pilares de zirconia 5Y-PSZ implantossuportados, o vidro soda-cal sem prata reduziu a infiltração microbiana na interface implante–pilar sem comprometer a resistência à fadiga. Esse efeito pode contribuir para a prevenção da peri-implantite, especialmente em regiões com risco de colonização bacteriana e fúngica.

Desta forma, o uso de vidro soda-cal dopado com boro como revestimento superficial de zircônias ultra-translúcidas (5Y-PSZ) oferece uma abordagem multifuncional, combinando preservação mecânica, efeito antimicrobiano e menor abrasividade ao antagonista, com potencial de aplicação tanto em restaurações dentárias convencionais quanto em componentes protéticos sobre implantes.

REFERÊNCIAS

Albrektsson T, Brånemark PI, Hansson HA, Lindstrom J. Osseointegrated titanium implants. Requirements for ensuring a long-lasting, direct bone-to-implant anchorage in man. *Acta Orthop Scand*. 1981;52(2):155-70. doi:[10.3109/17453678108991776](https://doi.org/10.3109/17453678108991776)

Baj A, Bolzoni A, Russillo A, Lauritano D, Palmieri A, Cura F, et al. Cone-morse implant connection system significantly reduces bacterial leakage between implant and abutment: an in vitro study. *J Biol Regul Homeost Agents*. 2017 Apr-Jun;31(2):203-8.

Buser D, Warrer K, Karring T. Formation of a periodontal ligament around titanium implants. *J Periodontol*. 1990 Sep;61(9):597-601. doi:[10.1902/jop.1990.61.9.597](https://doi.org/10.1902/jop.1990.61.9.597).

Cardenas R, Sánchez D, Euán R, Flores AM. Effect of fatigue loading and failure mode of different ceramic implant abutments. *J Prosthet Dent*. 2022 May;127(5):875-81. doi: [10.1016/j.prosdent.2020.09.059](https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.09.059)

da Gama Ramos G, Ciotti DL, Ferreira SRW, Margarido MRWF, Dantas RA, Guerreiro MN. The use of a hybrid pillar and its importance for aesthetic rehabilitation and tissue stability: a clinical report. *Case Rep Dent*. 2018;2018:6850720. doi: [10.1155/2018/6850720](https://doi.org/10.1155/2018/6850720)

D'Ercole S, Tripodi D, Ravera L, Perrotti V, Piattelli A, Iezzi G. Bacterial leakage in Morse cone internal connection implants using different torque values: an in vitro study. *Implant Dent*. 2014 Apr;23(2):175-9. doi: [10.1097/ID.0000000000000044](https://doi.org/10.1097/ID.0000000000000044)

Duarte AR, Rossetti PH, Rossetti LM, Torres SA, Bonachela WC. In vitro sealing ability of two materials at five different implant-abutment surfaces. *J Periodontol*. 2006 Nov;77(11):1828-32. doi:[10.1902/jop.2006.060101](https://doi.org/10.1902/jop.2006.060101).

Faria R, May LG, De Vasconcellos DK, Volpato CÂM, Bottino MA. Evaluation of the bacterial leakage along the implant-abutment interface. *J Dent Implants*. 2011;1(2):51-7. <https://doi.org/10.4103/0974-6781.91280>.

Furst MM, Salvi GE, Lang NP, Persson GR. Bacterial colonization immediately after installation on oral titanium implants. *Clin Oral Implants Res*. 2007 Aug;18(4):501-8. doi:[10.1111/j.1600-0501.2007.01381.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2007.01381.x).

Gross M, Abramovich I, Weiss EI. Microleakage at the abutment-implant interface of osseointegrated implants: a comparative study. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 1999 Jan-Feb;14(1):94-100.

Kirsten A, Hausmann M, Weber J, Fischer H. Bioactive and thermally compatible glass coating on zirconia dental implants. *J Dent Res*. 2015 Mar;94(3):297-303. doi: [10.1177/0022034514559250](https://doi.org/10.1177/0022034514559250).

Koutouzis T, Mesia R, Calderon N, Wong F, Wallet S. The effect of dynamic loading on bacterial colonization of the dental implant fixture–abutment interface: an in vitro

study. J Oral Implantol. 2014 Sep-Oct;40(5):432-7. doi: [10.1563/AAID-JOI-D-11-00207](https://doi.org/10.1563/AAID-JOI-D-11-00207).

Lopes AC, Rezende CEE, Fernandes MDS, Weinfeld I. Infiltração bacteriana na interface implante/pilar: considerações ao implantodontista. RGO. Revista Gaúcha de Odontologia (Online). 2010 Abr;58(2):239-42.

Lopez-Esteban S, Bartolome JF, Díaz LA, Esteban-Tejeda L, Prado C, López-Piriz R, et al. Mechanical performance of a biocompatible biocide soda-lime glass-ceramic. J Mech Behav Biomed Mater. 2014 May;34:302-12. doi: [10.1016/j.jmbbm.2014.02.019](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2014.02.019).

Magne P, Paranhos MPG, Burnett LH Jr, Magne M, Belser UC. Fatigue resistance and failure mode of novel-design anterior single-tooth implant restorations: influence of material selection for type III veneers bonded to zirconia abutments. Clin Oral Implants Res. 2011 Feb;22(2):195-200. doi: [10.1111/j.1600-0501.2010.02012.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2010.02012.x)

McCarthy GR, Guckes AD. Preventing bacterial colonization associated with two types of implant abutments. J Prosthet Dent. 1993 Nov;70(5):479. doi:[10.1016/0022-3913\(93\)90089-7](https://doi.org/10.1016/0022-3913(93)90089-7).

Melo CSDSA. Ensaios de fadiga mecânica sobre conexões implante–pilar [dissertação]. Porto (Portugal): Universidade Fernando Pessoa; 2015.
Soares MAD, Takamori ER. Avaliação de implantes dentais com conexão do tipo hexágono interno quanto à resistência à fadiga. Innov Implant J Biomater Esthet. 2011;(Impr.):41-6.

Norton MR. An in vitro evaluation of the strength of an internal conical interface compared to a butt joint interface in implant design. Clin Oral Implants Res. 1997 Aug;8(4):290-8. doi:[10.1034/j.1600-0501.1997.080407.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.1997.080407.x)

Norton MR. Assessment of cold welding properties of the internal conical interface of two commercially available implant systems. J Prosthet Dent. 1999 Aug;81(2):159-66. doi:[10.1016/S0022-3913\(99\)70243-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(99)70243-X)

O'Mahony A, MacNeill SR, Cobb CM. Design features that may influence bacterial plaque retention: a retrospective analysis of failed implants. Quintessence Int. 2000 May;31(4):249-56.

Persson LG, Lekholm U, Leonhardt A, Dahlen G, Lindhe J. Bacterial colonization on internal surfaces of Branemark system implant components. Clin Oral Implants Res. 1996 Apr;7(2):90-5. doi:[10.1034/j.1600-0501.1996.070201.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.1996.070201.x).

Ribeiro ADOP, Silva AC, Camargo Ribeiro F, Sabino CF, Junqueira JC, Ramos LP, et al. Biofilm formation and cell viability on monolithic zirconia with silver-doped soda-lime glass. J Mech Behav Biomed Mater. 2022 Sep;131:105222. doi: [10.1016/j.jmbbm.2022.105222](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105222).

Rodrigues CS, Silva AC, Sabino CF, Melo RM, Campos TMB. Borosilicate glass as a surface finishing alternative for improving the mechanical properties of third-generation zirconia. *Dent Mater*. 2024 Mar;40(3):477-83. doi: [10.1016/j.dental.2023.12.012](https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.012).

Sabino CF, Agarwalla SV, Rodrigues CS, Silva AC, Campos TMB, et al. Boron-containing coating yields enhanced antimicrobial and mechanical effects on translucent zirconia. *Dent Mater*. 2024 Jan;40(1):37-43. doi: [10.1016/j.dental.2023.10.011](https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.10.011).

Steinebrunner L, Wolfart S, Bossmann K, Kern M. In vitro evaluation of bacterial leakage along the implant-abutment interface of different implant systems. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2005 Nov-Dec;20(6):875-81.

Silva AC, Ribeiro ADOP, Alves LMM, Ribeiro FC, Campos TB, Marinho RMM. Zirconia gradation and thermal expansion compatibility between infiltration glass and antimicrobial glass. *Ceram Int*. 2022 Mar;48(2):1946-56. doi: [10.1016/j.ceramint.2022.03.242](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.242).

Silva AC, Silva JDFG, Rodrigues CS, Santos ELSousa, Junqueira JC, Campos TMB, et al. Unraveling the antimicrobial mechanisms and multifunctional performance of boron-doped glass coatings on dental zirconias. *Ceram Int*. 2025 Jan; doi: [10.1016/j.ceramint.2024.11.432](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.432).

Sonai GG. Preparação e caracterização de nanopartículas de prata em meio aquoso e orgânico, com impregnação em borrachas de silicone contendo trans [RuCl₂(vpy)₄] para fins antimicrobianos [TCC]. Florianópolis (SC): Universidade Federal de Santa Catarina; 2008.

Souza JGS, Bertolini M, Thompson A, Barão VAR, Dongari-Bagtzoglou A. Biofilm interactions of *Candida albicans* and mitis group streptococci in a titanium-mucosal interface model. *Appl Environ Microbiol*. 2020 Mar 2;86(5):e02950-19. doi: [10.1128/AEM.02950-19](https://doi.org/10.1128/AEM.02950-19).

Tripodi D, D'Ercole S, Iaculli F, Piattelli A, Perrotti V, Iezzi G. Degree of bacterial microleakage at the implant-abutment junction in Cone Morse tapered implants under loaded and unloaded conditions. *J Appl Biomater Funct Mater*. 2015 Oct;13(4):367-71. doi: [10.5301/jabfm.5000247](https://doi.org/10.5301/jabfm.5000247)

Vetromilla BM, Brondani LP, Pereira-Cenci T, Bergoli CD. Influence of different implant-abutment connection designs on the mechanical and biological behavior of single-tooth implants in the maxillary esthetic zone: A systematic review. *J Prosthet Dent*. 2019 Sep;121(3):398-403.e3. doi: [10.1016/j.prosdent.2018.05.007](https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.05.007).

Vidigal Jr GM. Evaluation of the implant connection interface using scanning electron microscopy. *Braz Dent J*. 1995 Jan-Mar;6(1):17-23. PMID: 8688644.

Zanotto ED, Migliore AR Jr. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução. Cerâmica. 1991;37:7-16.