

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), o texto completo desse trabalho será disponibilizado no repositório a partir de 05/04/2025.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Campus de São José dos Campos

Instituto de Ciência e Tecnologia

ANA BEATRIZ GOMES DE CARVALHO

**SOBREVIVÊNCIA EM FADIGA DE COROAS
BIOINSPIRADAS BILAMINADAS: estudo *in vitro***

2024

ANA BEATRIZ GOMES DE CARVALHO

**SOBREVIVÊNCIA EM FADIGA DE COROAS BIOINSPIRADAS
BILAMINADAS: estudo *in vitro***

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 Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em ODONTOLOGIA RESTAURADORA.

Área: Prótese Dentária. Linha de pesquisa: Desenvolvimento de biomateriais e novas tecnologias em Odontologia.

Orientador: Prof. Assist. Dr. Guilherme de Siqueira Ferreira Anzaloni Saavedra

Coorientadora: Profa. Dra. Nathália de Carvalho Ramos Ribeiro

São José dos Campos

2024

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2024]. 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).

Carvalho, Ana Beatriz Gomes de

Sobrevivência em fadiga de coroas bioinspiradas bilaminadas: estudo in vitro / Ana Beatriz Gomes de Carvalho. - São José dos Campos : [s.n.], 2024. 81 f. : il.

Tese (Doutorado) - - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2024.

Orientador: Guilherme de Siqueira Ferreira Anzaloni Saavedra
Coorientadora: Nathalia de Carvalho Ramos Ribeiro

1. Fadiga. 2. Biomimética. 3. Cerâmicas. 4. Prótese Parcial Fixa. 5. Análise de elementos finitos. I. Saavedra, Guilherme de Siqueira Ferreira Anzaloni, orient. II. Ribeiro, Nathalia de Carvalho Ramos, 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.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Assist. Guilherme de Siqueira Ferreira Anzaloni Saavedra (Orientador)

Universidade Estadual Paulista - UNESP

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Tit. Marco Antonio Bottino

Universidade Estadual Paulista - UNESP

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Pesquisadora II Renata Marques de Melo

Universidade Estadual Paulista - UNESP

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Tit. Luiz Felipe Valandro

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Faculdade de Odontologia

Campus de Santa Maria

Prof. Assoc. Carlos Eduardo Francci

Universidade de São Paulo - USP

Faculdade de Odontologia

Campus de São Paulo

São José dos Campos, 05 de abril de 2024.

DEDICATÓRIA

Dedico minha tese aos meus avós maternos *Maria José Soares Carneiro, Armando Ribeiro Carneiro*, e paternos *Maria Nazareth Coura Carvalho e Omar Gomes de Carvalho*, que com certeza celebram comigo no plano espiritual por mais uma conquista.

AGRADECIMENTOS

Impossível não começar agradecendo a Deus, que é a minha maior fonte de força e determinação para enfrentar qualquer momento difícil. Agradeço a vida, a saúde, e a possibilidade de ser uma pessoa melhor a cada dia.

Agradeço aos meus pais *Zilda e Omar*, e também a minha irmã *Gabriella*, pelo apoio imensurável em todos os aspectos. Nossa família é meu porto seguro, minha inspiração diária e também minha maior fonte de orgulho. Os altos e baixos dessa vida são amenizados pelo nosso carinho e parceria, e eu serei para sempre grata pela presença de vocês na minha vida.

Agradeço também a UNESP, que virou minha segunda casa há tantos anos. Entrei aqui com 18 anos e o sonho de ser dentista e hoje, 10 anos depois, encerro um grande capítulo, levando na bagagem tantas experiências incríveis. Agradeço ao apoio financeiro da CAPES (código de financiamento 001) e FAPESP (processo nº2020/07693-5), que me possibilitaram realizar grandes sonhos. Além de adquirir muito conhecimento nas áreas de pesquisa nas quais estou envolvida, também tive a oportunidade de realizar dois intercâmbios que foram extremamente enriquecedores não só para a minha formação profissional, mas também pessoal. Minha eterna gratidão a todos os funcionários da UNESP, em especial *Fernandinho, Marcão, Lilian, Juliane e Thais* que sempre foram tão gentis comigo neste tempo.

Ao meu orientador *Prof. Guilherme*, agradeço por sempre acreditar que eu consigo ir além. Sua forma de orientar me trouxe conhecimento em Odontologia, e também um importante conhecimento sobre a vida. Obrigada pela confiança que depositou em mim em todos esses anos de muito trabalho e aprendizado. A minha coorientadora *Profa. Nathália*, por sempre ser um exemplo de educação, inteligência e competência. Obrigada por estar comigo em todos os momentos, dentro e fora da

Universidade e pela amizade incrível que construímos nestes anos.

Ao *Prof. Marco Bottino*, obrigada por ter me acolhido desde o primeiro dia em que decidi que gostaria de fazer Pós-graduação na UNESP. Seu amor pela profissão e pela Universidade me inspiram a ser uma profissional melhor.

A *Prof. Renata*, obrigada por ser sempre tão solícita e gentil comigo, e pela oportunidade de aprender um pouco do seu tão valioso conhecimento. Ao *Prof. Felipe Valandro*, agradeço por ter me recebido no seu laboratório em Santa Maria, por ter compartilhado seu tempo e seus alunos, *Kiara e Renan*, para auxiliar no meu trabalho. Além de um teste de fadiga excelente, ainda ganhei dois amigos incríveis! Sua inteligência e competência são admiráveis. Ao *Prof. Carlos Francci*, o qual conheci a partir do meu orientador Prof. Guilherme, conheci seu trabalho e passei a admirá-lo como pessoa e profissional. Obrigada a todos vocês por fazerem parte deste momento tão especial para mim.

Agradeço ainda aos grandes colaboradores: *Lincoln* do laboratório Prime que juntamente com meu colega *Guilherme Schmitt* realizaram a estratificação das peças deste trabalho; e também a *Prof. Eliandra* da UNIFESP que realizou as imagens de microscopia eletrônica de varredura. Obrigada por doarem o precioso tempo de vocês para auxiliar na confecção deste projeto.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos que fiz na Pós-graduação, em especial *Rossana, Joyce, Guilherme, Ana Carolina, Clarice, Génesis, Talita e Amir*. Obrigada por deixarem os dias no laboratório mais alegres e leves, por todas as conversas acompanhadas de um café, e todas as risadas que compartilhamos. Todos esses momentos são guardados com carinho. Ainda, agradeço a minha psicóloga e amiga *Ruanda* que me ajuda desde o Mestrado a manter minha saúde emocional, você foi e ainda é fundamental em todo esse processo.

Agradeço ao *Prof. Marco C. Bottino*, por me receber na Universidade de

Michigan e me proporcionar um intenso crescimento profissional e pessoal no último ano. Admiro muito seu trabalho e sua liderança no laboratório, e agradeço imensamente a oportunidade de aprender com o senhor. A todos os meus colegas e amigos que fiz na Universidade de Michigan, que se tornaram minha segunda família em um período muito importante da minha (e nossa) vida. Celebramos cada conquista e nos apoiamos em cada dificuldade, encontramos conforto nas pequenas coisas quando estávamos longe dos nossos. Obrigada por todo o apoio, por todas as experiências e pela parceria. Além de experiências incríveis com meus amigos, o intercâmbio para Michigan ainda me trouxe a oportunidade de conhecer meu namorado *Christopher*, que alegra meus dias com muito amor e leveza, mesmo que há muitos quilômetros de distância. Obrigada por me admirar, por celebrar minhas conquistas, e me amar do jeito que eu sou.

Estamos neste plano para evoluir espiritualmente, e eu acredito que cada um que cruza meu caminho todos os dias têm algo para me ensinar. Encerro esse capítulo com o coração cheio de alegria, serei eternamente grata por cada ensinamento, cada risada, cada choro, e cada desafio. Obrigada a todos que passaram pelo meu caminho em todos esses anos!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
RESUMO	13
<i>ABSTRACT</i>	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Cerâmicas como material restaurador	20
2.2 Combinação de materiais cerâmicos	22
2.2 Bioinspiração	24
3 OBJETIVO	27
3.1 Objetivos específicos	27
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 Delineamento experimental	28
4.2 Confeção dos espécimes	33
4.2.1 Confeção dos preparos	33
4.2.2 Confeção das coroas	35
4.2.3 Cimentação das coroas/infraestruturas sobre os preparos	42
4.2.4 Cimentação das facetas sobre as infraestruturas	44
4.3 Teste de fadiga cíclica	45
4.4 Análise fractográfica	47
4.5 Análise por Elementos Finitos (FEA)	48

5 RESULTADOS	51
5.1 Estudo A	51
5.1.1 Teste de fadiga	51
5.1.2 Análise por Elementos Finitos (FEA)	54
5.1.3 Análise de fratura	56
5.2 Estudo B	58
5.2.1 Teste de fadiga	58
5.2.2 Análise por Elementos Finitos	61
5.1.3 Análise de fratura	64
6 DISCUSSÃO	67
7 CONCLUSÃO	72
REFERÊNCIAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização dos grupos experimentais e dos testes mecânicos realizados no Estudo A.....	29
Figura 2 - Esquematização dos grupos experimentais e dos testes mecânicos realizados no Estudo B.....	30
Figura 3 - Ilustração do preparo em incisivo central superior.....	33
Figura 4 - Confeção dos preparos. (A) Preparos em resina epóxi reforçada por fibra de vidro; (B) Preparos em vistas frontal (vista vestibular), direita, traseira (vista lingual) e esquerda; (C) Matriz de nylon utilizada para embutir os preparos em resina acrílica; (D) Imagem final do preparo após ser embutido em base de resina.	35
Figura 5 - Dimensões das infraestruturas e dos recobrimentos dos grupos. A imagem da direita ilustra esquematicamente o grupo IC, já a imagem da esquerda representa os demais grupos	36
Figura 6 - Confeção das infraestruturas convencionais (A e B) imagem do software inLab no momento do desenho das peças e (C e D) infraestruturas após processo de fresagem	37
Figura 7 - Confeção das infraestruturas modificadas (A e B) imagem do software inLab no momento do desenho das peças e (C e D) infraestruturas após processo de fresagem	38
Figura 8 - Coroas do grupo IC após processo de estratificação dos recobrimentos	39
Figura 9 - Confeção dos recobrimentos (A e B) desenho no software inLab e (C) após fresagem.....	39
Figura 10 - Diferenças entre as infraestruturas convencional e modificada em vistas (A) frontal e (B) lateral.....	40

Figura 11 - Etapas da cimentação das coroas sobre as infraestruturas (A) aplicação do ácido fluorídrico; (B) lavagem do preparo com jato de ar e água; (C) aplicação do adesivo na superfície do preparo; (D) aplicação do primer autocondicionante Monobond Etch & Prime; (E) lavagem da superfície interna da coroa; (F) aplicação do agente cimentante na porção interna da coroa; (G) remoção dos excessos de cimento resinoso após posicionar a coroa sobre o preparo; (H) fotopolimerização do conjunto e (I) aspecto final da coroa sobre o preparo após processo de cimentação.	43
Figura 12 - Cimentação adesiva das facetas sobre suas infraestruturas (A) condicionamento da porção externa da infraestrutura e da; (B) porção interna do recobrimento com Monobond Etch & Prime; (C) lavagem das superfícies com jato de ar e água; (D) aplicação do agente cimentante sobre a superfície interna das facetas; (E) pressão digital para promover extravasamento dos excessos e (F) aspecto final após fotopolimerização.	44
Figura 13 - Posição do espécime na máquina, durante a realização do teste de fadiga em vistas (A) lateral e (B) superior	47
Figura 14 - Etapas da Análise por Elementos Finitos (FEA) (A) malha 3D do conjunto para FEA; (B) modelo 3D gerado a partir da malha e aplicação de carga no local indicado	49
Figura 15 - Gráfico de probabilidade de sobrevivência (%) para carga para falha em fadiga (N) e número de ciclos para falha para o Evento 1	52
Figura 16 - Gráfico de probabilidade de sobrevivência (%) para carga para falha em fadiga (N) e número de ciclos para falha para o Evento 2	53
Figura 17 - Resultados de FEA para Tensão Máxima Principal (MPa) para os diferentes grupos do Estudo A	55

Figura 18 - Resultados de tensão de Von Mises de acordo com os diferentes grupos do Estudo A	55
Figura 19 - Imagens de estereomicroscopio das coroas fraturadas	56
Figura 20 - Imagens de MEV para o Estudo A	57
Figura 21 - Gráfico de probabilidade de sobrevivência (%) para carga para falha em fadiga (N) e número de ciclos para falha para o Evento 1	59
Figura 22 - Gráfico de probabilidade de sobrevivência (%) para carga para falha em fadiga (N) e número de ciclos para falha para o Evento 2	60
Figura 23 - Resultados de FEA para Tensão Máxima Principal (MPa) na infraestrutura, camada de cimento e recobrimento para os diferentes grupos do Estudo B	62
Figura 24 - Resultados de tensão de Von Mises de acordo com os diferentes grupos do Estudo B	64
Figura 25 - Imagens de MEV do Estudo B	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B	Temperatura inicial
PVC	Polyvinyl chloride (policloreto de vinil)
CAD	Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Fabricação Assistida por Computador)
CH	Cerâmica híbrida
cm	Centímetros
DL	Dissilicato de lítio
FEA	Finite Element Analysis (Análise por Elementos Finitos)
H1/H2	Tempo de espera durante o processo de queima da cerâmica
IC	Infraestrutura
IMC	Infraestrutura modificada cimentada
IME	Infraestrutura modificada estratificada
L	Esfriamento lento
LEU	Leucita
MPa	Megapascal (unidade padrão de pressão e tensão)
MPS	Maximum Principal Stress (Tensão Máxima Principal)
mW	Miliwatts
S	Tempo de fechamento do forno de cerâmica
stl	Standard Tessellation Language (Linguagem de Tesselação Padrão)
T1/T2	Temperatura de queima da cerâmica
V1/V2	Vácuo durante o processo de queima da cerâmica

Carvalho ABG. Sobrevivência em fadiga de coroas bioinspiradas bilaminadas: estudo *in vitro* [tese]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2024.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento biomecânico através da resistência à fadiga e análise por elementos finitos de coroas bioinspiradas bilaminadas com infraestruturas modificadas na superfície vestibular (Estudo A) e utilizando diferentes materiais cerâmicos com módulos elásticos distintos (Estudo B). Para isso, foram confeccionados 90 preparos para coroa total em resina epóxi G10, sobre os quais foram preparadas coroas bioinspiradas de acordo com os seguintes grupos: Estudo A - IC (infraestrutura convencional), IME (infraestrutura modificada estratificada) e IMC (infraestrutura modificada cimentada), todas confeccionadas em dissilicato de lítio (infraestrutura) + porcelana (recobrimento); Estudo B – DL+LEU (dissilicato de lítio + leucita), LEU+DL (leucita + dissilicato de lítio), CH+DL (cerâmica híbrida + dissilicato de lítio) e CH+LEU (cerâmica híbrida + leucita). Para o Estudo A, todas as infraestruturas foram usinadas; os recobrimentos dos grupos IC e IME foram confeccionados através da estratificação, e os recobrimentos do grupo IMC foram usinados. Já para o Estudo B, todas as peças foram usinadas, de acordo com o material cerâmico de cada grupo. Em seguida, foi realizada a cimentação adesiva dos recobrimentos sobre as infraestruturas (a depender do grupo) e das coroas sobre os preparos utilizando cimento resinoso fotopolimerizável (Variolink Esthetic LC). Após a cimentação, os espécimes foram submetidos ao teste de fadiga cíclica (10.000 ciclos, 20Hz), e como desfecho foram considerados dois eventos, em que o primeiro foi a ocorrência de trinca e/ou lascamento (evento 1) e o segundo foi a falha catastrófica do conjunto (evento 2). Os valores de carga e número de ciclos para falha em que foram observados os eventos 1 e 2 foram utilizados para realizar a análise de sobrevivência de acordo com Kaplan-Meier e Log-Rank (Mantel-Cox; 95%). As marcas de fratura e o modo de falha das coroas foram avaliados e classificados por estereomicroscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura. Por fim, foi realizada análise por elementos finitos (FEA) para ambos os estudos, a fim de avaliar a distribuição de tensões sobre

as coroas e interface adesiva. Para o Estudo A, os resultados do teste de fadiga mostraram que, considerando o evento 1 (trinca/lascamento), os grupos IC e IMC apresentaram médias de carga fadiga estatisticamente significantes entre si (733,33 N e 913,33 N, respectivamente), enquanto o grupo IME apresentou média superior (1.020 N). O mesmo foi observado para o número de ciclos em fadiga para todos os grupos. Ao considerar o evento 2 (falha catastrófica), os três grupos apresentaram médias estatisticamente semelhantes entre si (~1.028 N). Os resultados de FEA mostraram que o grupo IC concentrou maior tensão de tração do que os grupos IME e IMC. Para o Estudo B, no teste de fadiga, o grupo DL+LEU apresentou a maior média de resistência à fadiga (evento 1: 913,33 N e evento 2: 1033,33 N), enquanto todas as outras combinações de materiais cerâmicos analisadas foram estatisticamente semelhantes entre si, considerando carga e número de ciclos. Com relação ao FEA, os grupos com cerâmica híbrida (CH+DL e CH+LEU) apresentaram menores picos de concentração de tensão na infraestrutura do que os grupos com cerâmicas vítreas (DL+LEU e LEU+DL), porém, em contrapartida, concentraram maior tensão na interface adesiva. Com isso, conclui-se que a utilização da infraestrutura modificada é uma alternativa viável e promissora para tratamentos reabilitadores, apresentando sobrevivência em fadiga e distribuição de tensões satisfatórias. Além disso, a combinação entre uma infraestrutura de dissilicato de lítio e recobrimento de cerâmica a base de leucita corresponde a melhor abordagem considerando a infraestrutura modificada.

Palavras-chave: Fadiga. Biomimética. Cerâmicas. Prótese Parcial Fixa. Análise de elementos finitos.

Carvalho ABG. Fatigue survival rate of bioinspired bilaminar crowns: in vitro study [doctorate thesis]. São José dos Campos (SP): Sao Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2024.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the biomechanical behavior through fatigue resistance and finite element analysis of bilaminar bioinspired crowns with modified infrastructures on the buccal surface (Study A) and using different ceramic materials with different elastic moduli (Study B). For this, 90 preparations were made for a full crown in G10 epoxy resin, on which bioinspired crowns were prepared according to the following groups: Study A - CI (conventional infrastructure), SMI (stratified modified infrastructure) and CMI (cemented modified infrastructure), all made of lithium disilicate (infrastructure) + porcelain (veneer); Study B - LD+LEU (lithium disilicate + leucite), LEU+LD (leucite + lithium disilicate), HC+LD (hybrid ceramic + lithium disilicate) and HC+LEU (hybrid ceramic + leucite). For Study A, all infrastructures were machined; the coverings of the CI and SMI groups were made through stratification technique, and the veneers of the SMI group were machined. For Study B, all pieces were machined, according to the ceramic material of each group. Then, the veneers were cemented into their infrastructures (depending on the group) and crowns were cemented into preparations using light-cured resin cement (Variolink Esthetic LC). After cementing, the specimens were subjected to the cyclic fatigue test (10,000 cycles, 20Hz), and as an outcome two events were considered: the occurrence of cracking and/or chipping (event 1) and catastrophic failure (event 2). The load (N) and number of cycles to failure in which events 1 and 2 were observed were used to perform the survival analysis according to Kaplan-Meier and Log-Rank (Mantel-Cox; 95%). The fracture marks and failure mode of the crowns were evaluated and classified by optical stereomicroscope and scanning electron microscope. Finally, finite element analysis (FEA) was performed for both studies in order to evaluate the stress distribution over the crowns and adhesive interface. For Study A, the results of the fatigue test showed that, considering event 1 (cracking/chipping), the CI and CMI groups presented average to failure that were statistically significant compared to each other (733.33 N and 913.33 N, respectively), while the SMI group showed higher averages (1,020 N). Same pattern was observed for the number of cycles under fatigue for both groups. When considering event 2 (catastrophic

failure), the three groups presented statistically similar means (~1,028 N). The FEA results showed that the CI group concentrated greater tensile stress than the CMI and SMI groups. For Study B, in the fatigue test, the LC+LEU group presented the highest average fatigue resistance (event 1: 913.33 N and event 2: 1033.33 N), while all other combinations of ceramic materials analyzed were statistically similar to each other, considering load and number of cycles. Regarding FEA, the groups with hybrid ceramics (HC+LC and HC+LEU) showed lower stress concentration peaks in the infrastructure than the groups with glassy ceramics (LC+LEU and LEU+LC), however; on the other hand, concentrated greater tension at the adhesive interface. With this, it is concluded that the use of modified infrastructure is a viable and promising alternative for oral rehabilitation treatments, presenting satisfactory fatigue survival and adequate stress distribution. Furthermore, the combination of a lithium disilicate infrastructure and a leucite-based ceramic coating corresponds to the best approach considering the modified infrastructure.

Keywords: Fatigue. Biomimetics. Ceramics. Denture, Partial, Fixed. Finite element analysis.

7 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos no presente estudo pode-se concluir que as infraestruturas modificadas consistem em uma alternativa promissora para tratamentos reabilitadores em região anterior, apresentando alta sobrevivência à fadiga e distribuição de tensões uniforme. Ainda, a combinação entre dissilicato de lítio e cerâmica a base de leucita consistem na melhor alternativa restauradora ao considerar a sobrevivência em fadiga.

REFERÊNCIAS

- Alessandretti R, Borba M, Della Bona A. Cyclic contact fatigue resistance of ceramics for monolithic and multilayer dental restorations. *Dental Materials*. 2020;36(4):535–41. doi: 10.1016/j.dental.2020.02.006.
- Anami L, Lima J, Valandro L, Kleverlaan C, Feilzer A, Bottino M. Fatigue Resistance of Y-TZP/Porcelain Crowns is Not Influenced by the Conditioning of the Intaglio Surface. *Oper Dent*. 2016;41(1):E1–12. doi: 10.2341/14-166-L.
- Basso G, Kodama A, Pimentel A, Kaizer M, Bona A Della, Moraes R, et al. Masking Colored Substrates Using Monolithic and Bilayer CAD-CAM Ceramic Structures. *Oper Dent*. 2017;42(4):387–95. doi: 10.2341/16-247-L.
- Bazos P, Magne P. Bioemulation: biomimetically emulating nature utilizing a histo-anatomic approach; visual synthesis. *Eur J Esthet Dent*. 2014;9(3):330–52.
- Bazos P, Magne P. Bio-emulation: biomimetically emulating nature utilizing a histo-anatomic approach; structural analysis. *Eur J Esthet Dent*. 2011;6(1):8–19.
- Belli R, Wendler M, de Ligny D, Cicconi MR, Petschelt A, Peterlik H, et al. Chairside CAD/CAM materials. Part 1: Measurement of elastic constants and microstructural characterization. *Dent Mater*. 2017;33(1):84–98. doi: 10.1016/j.dental.2016.10.009.
- Benetti P, Kelly JR, Sanchez M, Della Bona A. Influence of thermal gradients on stress state of veneered restorations. *Dental Materials*. 2014;30(5):554–63. doi: 10.1016/j.dental.2014.02.020.
- Beuer F, Schweiger J, Eichberger M, Kappert H, Gernet W, Edelhoff D. High-strength CAD/CAM-fabricated veneering material sintered to zirconia copings — A new fabrication mode for all-ceramic restorations. *Dental Materials*. 2009;25(1):121–8. doi: 10.1016/j.dental.2008.04.019.
- Bona A Della, Kelly JR. The Clinical Success Of All-Ceramic Restorations. *The Journal of the American Dental Association*. 2008;139(9 SUPPL.):S8–13. doi: 10.14219/jada.archive.2008.0361.

- Borba M, de Araújo MD, de Lima E, Yoshimura HN, Cesar PF, Griggs JA, et al. Flexural strength and failure modes of layered ceramic structures. *Dental Materials*. 2011;27(12):1259–66. doi: 10.1016/j.dental.2011.09.008.
- Bottino MA, Salazar-Marochó SM, Leite FPP, Vásquez VC, Valandro LF. Flexural Strength of Glass-Infiltrated Zirconia/Alumina-Based Ceramics and Feldspathic Veneering Porcelains. *Journal of Prosthodontics*. 2009;18(5):417–20. doi: 10.1111/j.1532-849X.2009.00462.x.
- Conejo J, Stone-Hirsch L, Ann S, Bergler M, Blatz MB. Veneer and Crown Shade Matching: A Digital Approach. In: Duarte Jr S, editor. *QDT 2020: Quintessence of Dental Technology*, Chicago: Quintessence Pub. Co; 2020, p. 99–107.
- Conrad HJ, Seong W-J, Pesun IJ. Current ceramic materials and systems with clinical recommendations: A systematic review. *J Prosthet Dent*. 2007;98(5):389–404. doi: 10.1016/S0022-3913(07)60124-3.
- Cui C, Sun J. Optimizing the design of bio-inspired functionally graded material (FGM) layer in all-ceramic dental restorations. *Dent Mater J*. 2014;33(2):173–8. doi: 10.4012/dmj.2013-264.
- Dal Piva AMO, Tribst JPM, Borges ALS. Influence of substrate design for in vitro mechanical testing. *J Clin Exp Dent*. 2019;11(2):119–25. doi: 10.4317/jced.55353.
- Denry I, Holloway JA. Ceramics for dental applications: A review. *Materials*. 2010;3(1):351–68. doi: 10.3390/ma3010351.
- Elsaka SE, Elnaghy AM. Mechanical properties of zirconia reinforced lithium silicate glass-ceramic. *Dental Materials*. 2016;32(7):908–14. doi: 10.1016/j.dental.2016.03.013.
- Ereifej N, Rodrigues FP, Silikas N, Watts DC. Experimental and FE shear-bonding strength at core/veneer interfaces in bilayered ceramics. *Dental Materials*. 2011;27(6):590–7. doi: 10.1016/j.dental.2011.03.001.
- Fasbinder DJ, Dennison JB, Heys D, Neiva G. A Clinical Evaluation of Chairside Lithium Disilicate CAD/CAM Crowns. *The Journal of the American Dental Association*. 2010;141:10S-14S. doi: 10.14219/jada.archive.2010.0355.

Gamborena I, Sasaki Y, Blatz MB. Novel Approach for Predictably Matching a Veneer to an Implant Crown. QDT 2019: Quintessence of Dental Technology., Chicago: Quintessence Pub. Co; 2019, p. 7–14.

Gracis S, Thompson V, Ferencz J, Silva N, Bonfante E. A New Classification System for All-Ceramic and Ceramic-like Restorative Materials. *Int J Prosthodont.* 2016;28(3):227–35. doi: 10.11607/ijp.4244.

Gresnigt M, Magne M, Magne P. Porcelain veneer post-bonding crack repair by resin infiltration. *Int J Esthet Dent.* 2017;12(2):156–70.

Griggs JA. Recent Advances in Materials for All-Ceramic Restorations. *Dent Clin North Am.* 2007;51(3):713–27. doi: 10.1016/j.cden.2007.04.006.Recent.

Guess PC, Schultheis S, Bonfante EA, Coelho PG, Ferencz JL, Silva NRFA. All-ceramic systems: Laboratory and clinical performance. *Dent Clin North Am.* 2011;55(2):333–52. doi: 10.1016/j.cden.2011.01.005.

Hallmann L, Ulmer P, Kern M. Effect of microstructure on the mechanical properties of lithium disilicate glass-ceramics. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2018;82:355–70. doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.02.032.

Harada K, Raigrodski AJ, Chung K-H, Flinn BD, Dogan S, Mancl LA. A comparative evaluation of the translucency of zirconias and lithium disilicate for monolithic restorations. *J Prosthet Dent.* 2016;116(2):257–63. doi: 10.1016/j.prosdent.2015.11.019.

Heffernan MJ, Aquilino SA, Diaz-Arnold AM, Haselton DR, Stanford CM, Vargas MA. Relative translucency of six all-ceramic systems. Part II: Core and veneer materials. *Journal of Prosthetic Dentistry.* 2002;88(1):10–5. doi: 10.1016/S0022-3913(02)00041-0.

Huang M, Wang R, Thompson V, Rekow D, Soboyejo WO. Bioinspired design of dental multilayers. *J Mater Sci Mater Med.* 2007;18(1):57–64. doi: 10.1007/s10856-006-0662-0.

Imbeni V, Kruzic JJ, Marshall GW, Marshall SJ, Ritchie RO. The dentin–enamel junction and the fracture of human teeth. *Nat Mater.* 2005;4(3):229–32. doi: 10.1038/nmat1323.

Jo E-H, Huh Y-H, Ko K-H, Park C-J, Cho L-R. Effect of different ceramic materials and substructure designs on fracture resistance in anterior restorations. *J Prosthet Dent.* 2022;127(5):785–92. doi: 10.1016/j.prosdent.2020.09.056.

Kanat-Ertürk B, Çömlekoğlu EM, Dündar-Çömlekoğlu M, Özcan M, Güngör MA. Effect of Veneering Methods on Zirconia Framework-Veneer Ceramic Adhesion and Fracture Resistance of Single Crowns. *Journal of Prosthodontics.* 2015;24(8):620–8. doi: 10.1111/jopr.12236.

Kelly JR. Clinically relevant approach to failure testing of all-ceramic restorations. *J Prosthet Dent.* 1999;81(6):652–61. doi: 10.1016/S0022-3913(99)70103-4.

Kelly JR, Nishimura I, Campbell SD. Ceramics in dentistry: Historical roots and current perspectives. *J Prosthet Dent.* 1996;75(1):18–32. doi: 10.1016/S0022-3913(96)90413-8.

Kolakarnprasert N, Kaizer MR, Kim DK, Zhang Y. New multi-layered zirconias: Composition, microstructure and translucency. *Dental Materials.* 2019;35(5):797–806. doi: 10.1016/j.dental.2019.02.017.

Kurbad A. Digital veneering--manufacturing computer-generated veneers with the CAD-on technique. *Int J Comput Dent.* 2011;14(3):255–71.

Lima JMC, Souza ACO, Anami LC, Bottino MA, Melo RM, Souza ROA. Effects of thickness, processing technique, and cooling rate protocol on the flexural strength of a bilayer ceramic system. *Dental Materials.* 2013;29(10):1063–72. doi: 10.1016/j.dental.2013.07.019.

Lin CP, Douglas WH, Erlandsen SL. Scanning electron microscopy of type I collagen at the dentin-enamel junction of human teeth. *Journal of Histochemistry and Cytochemistry.* 1993;41(3):381–8. doi: 10.1177/41.3.8429200.

Madfa AA, Yue X-G. Dental prostheses mimic the natural enamel behavior under functional loading: A review article. *Japanese Dental Science Review.* 2016;52(1):2–13. doi: 10.1016/j.jdsr.2015.07.001.

Magne P, Belser UC. Compreensão da estrutura dental intacta e do princípio de Biomimética. In: Magne P, Belser UC, editors. *Restaurações adesivas de porcelana na dentição anterior: uma abordagem biomimética*, São Paulo: Quintessence Pub. Co; 2003, p. 23–56.

- Magne P, Carvalho AO, Bruzi G, Giannini M. Fatigue resistance of ultrathin CAD/CAM complete crowns with a simplified cementation process. *J Prosthet Dent.* 2015;114(4):574–9. doi: 10.1016/j.prosdent.2015.04.014.
- Malament KA, Natto ZS, Thompson V, Rekow D, Eckert S, Weber H-P. Ten-year survival of pressed, acid-etched e.max lithium disilicate monolithic and bilayered complete-coverage restorations: Performance and outcomes as a function of tooth position and age. *J Prosthet Dent.* 2019;121(5):782–90. doi: 10.1016/j.prosdent.2018.11.024.
- Marchack BW, Sato S, Marchack CB, White SN. Complete and partial contour zirconia designs for crowns and fixed dental prostheses: A clinical report. *J Prosthet Dent.* 2011;106(3):145–52. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(11\)60112-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(11)60112-1).
- Marshall GW, Marshall SJ, Kinney JH, Balooch M. The dentin substrate: structure and properties related to bonding. *J Dent.* 1997;25(6):441–58. doi: 10.1016/S0300-5712(96)00065-6.
- Marshall Jr GW, Balooch M, Gallagher RR, Gansky SA, Marshall SJ. Mechanical Properties of the Dentinoenamel Junction: AFM Studies of Nanohardness, Elastic Modulus, and Fracture. *J Biomed Mater Res.* 2001;54(1):87–95. doi: 10.1002/1097-4636(200101)54:1<87::aid-jbm10>3.0.co;2-z.
- Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J.* 2009;28(1):44–56. doi: 10.4012/dmj.28.44.
- Molin MK, Karlsson SL. Five-year clinical prospective evaluation of zirconia-based Denzir 3-unit FPDs. *Int J Prosthodont.* 2008;21(3):223–7.
- Molina I, Goldberg J, Volpato CM, Magne P. Accelerated fatigue resistance of novel-design histoanatomic implant restorations made of CAD/CAM bilaminar assemblies. *Int J Esthet Dent.* 2017;12(3):336–51.
- Nagai E, Otani K, Satoh Y, Suzuki S. Repair of denture base resin using woven metal and glass fiber: Effect of methylene chloride pretreatment. *J Prosthet Dent.* 2001;85(5):496–500. doi: 10.1067/mpr.2001.115183.

Niu X, Rahbar N, Farias S, Soboyejo W. Bio-inspired design of dental multilayers: Experiments and model. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2009;2(6):596–602. doi: 10.1016/j.jmbbm.2008.10.009.

Pjetursson BE, Sailer I, Makarov NA, Zwahlen M, Thoma DS. All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part II: Multiple-unit FDPs. *Dental Materials*. 2015;31(6):624–39. doi: 10.1016/j.dental.2015.02.013.

Politano G, Van Meerbeek B, Peumans M. Nonretentive bonded ceramic partial crowns: concept and simplified protocol for long-lasting dental restorations. *J Adhes Dent*. 2018;20(6):495–510. doi: 10.3290/j.jad.a41630.

Quinn GD, Hoffman K, Quinn JB. Strength and fracture origins of a feldspathic porcelain. *Dental Materials*. 2012;28(5):502–11. doi: 10.1016/j.dental.2011.12.005.

Quinn J, Quinn G, Sundar V. Fracture toughness of veneering ceramics for fused to metal (PFM) and zirconia dental restorative materials. *J Res Natl Inst Stand Technol*. 2010;115(5):343. doi: 10.6028/jres.115.024.

Rahbar N, Soboyejo WO. Design of functionally graded dental multilayers. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2011;34(11):887–97. doi: 10.1111/j.1460-2695.2011.01581.x.

Raigrodski AJ. Contemporary materials and technologies for all-ceramic fixed partial dentures: A review of the literature. *J Prosthet Dent*. 2004;92(6):557–62. doi: 10.1016/j.prosdent.2004.09.015.

Raigrodski AJ, Hillstead MB, Meng GK, Chung K-H. Survival and complications of zirconia-based fixed dental prostheses: A systematic review. *J Prosthet Dent*. 2012;107(3):170–7. doi: 10.1016/S0022-3913(12)60051-1.

Ramos G, Monteiro E, Bottino M, Zhang Y, Marques de Melo R. Failure Probability of Three Designs of Zirconia Crowns. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2015;35(6):843–9. doi: 10.11607/prd.2448.

Ramos N de C, Campos TMB, Paz IS de La, Machado JPB, Bottino MA, Cesar PF, et al. Microstructure characterization and SCG of newly engineered dental ceramics. *Dent Mater*. 2016;32(7):870–8. doi: 10.1016/j.dental.2016.03.018.

- Raptis N V, Michalakis KX, Hirayama H. Optical behavior of current ceramic systems. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2006;26(1):31–41. doi: 10.11607/prd.00.0671.
- Robinson C, Weatherell JA, Hallsworth AS. Variation in Composition of Dental Enamel Within Thin Ground Tooth Sections. *Caries Res*. 1971;5(1):44–57. doi: 10.1159/000259731.
- Rosentritt M, Steiger D, Behr M, Handel G, Kolbeck C. Influence of substructure design and spacer settings on the in vitro performance of molar zirconia crowns. *J Dent*. 2009;37(12):978–83. doi: 10.1016/j.jdent.2009.08.003.
- Saavedra G, Schmitt De Andrade G, Gomes De Carvalho AB, Fernanda N, Carlos B, Diogo EF, et al. *Tecnologia CAD/CAM na Odontologia Restauradora. Restaurações Cerâmicas*. 1st ed., Editora Ponto; 2022, p. 310–65.
- Sailer I, Holderegger C, Jung RE, Suter A, Thiévent B, Pietrobon N, et al. Clinical study of the color stability of veneering ceramics for zirconia frameworks. *Int J Prosthodont*. 2007;20(3):263–9.
- Sailer I, Makarov NA, Thoma DS, Zwahlen M, Pjetursson BE. All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part I: Single crowns (SCs). *Dent Mater*. 2015;31(6):603–23. doi: 10.1016/J.DENTAL.2015.02.011.
- Schlichting LH, Schlichting KK, Stanley K, Magne M, Magne P. An approach to biomimetics: The natural CAD/CAM restoration: A clinical report. *J Prosthet Dent*. 2014;111(2):107–15. doi: 10.1016/j.prosdent.2013.08.006.
- Schmitter M, Mueller D, Rues S. Chipping behaviour of all-ceramic crowns with zirconia framework and CAD/CAM manufactured veneer. *J Dent*. 2012;40(2):154–62. doi: 10.1016/j.jdent.2011.12.007.
- Seydler B, Schmitter M. Clinical performance of two different CAD/CAM-fabricated ceramic crowns: 2-Year results. *J Prosthet Dent*. 2015;114(2):212–6. doi: 10.1016/j.prosdent.2015.02.016.
- Skjold A, Schriwer C, Gjerdet NR, Øilo M. Fractographic analysis of 35 clinically fractured bi-layered and monolithic zirconia crowns. *J Dent*. 2022;125. doi: 10.1016/j.jdent.2022.104271.

Solá-Ruiz MF, Leon-Martine R, Labaig-Rueda C, Selva-Otalaorrouchi E, Agustín-Panadero R. Clinical outcomes of veneered zirconia anterior partial fixed dental prostheses: A 12-year prospective clinical trial. *J Prosthet Dent.* 2022;127(6):846–51. doi: 10.1016/j.prosdent.2020.09.046.

Tanaka CB, Ballester RY, De Souza GM, Zhang Y, Meira JBC. Influence of residual thermal stresses on the edge chipping resistance of PFM and veneered zirconia structures: Experimental and FEA study. *Dental Materials.* 2019;35(2):344–55. doi: 10.1016/j.dental.2018.11.034.

Tinschert J, Zwez D, Marx R, Anusavice KJ. Structural reliability of alumina-, feldspar-, leucite-, mica- and zirconia-based ceramics. *J Dent.* 2000;28(7):529–35. doi: 10.1016/S0300-5712(00)00030-0.

Tribst João Paulo Mendes, Dal Piva AM de O, Borges ALS, Bottino MA. Different combinations of CAD/CAM materials on the biomechanical behavior of a two-piece prosthetic solution. *Int J Comput Dent.* 2019;22(2):171–6.

Tribst J P M, Dal Piva AMO, Özcan M, Borges ALS, Bottino MA. Influence of Ceramic Materials on Biomechanical Behavior of Implant Supported Fixed Prosthesis with Hybrid Abutment. *Eur J Prosthodont Restor Dent.* 2019;27(2):76–82. doi: 10.1922/EJPRD_01829Tribst07.

Tsalouchou E, Cattell M, Knowles J, Pittayachawan P, McDonald A. Fatigue and fracture properties of yttria partially stabilized zirconia crown systems. *Dental Materials.* 2008;24(3):308–18. doi: 10.1016/j.dental.2007.05.011.

Velho HC, Dapieve KS, Rocha Pereira GK, Fraga S, Valandro LF, Venturini AB. Accelerated loading frequency does not influence the fatigue behavior of polymer infiltrated ceramic network or lithium disilicate glass-ceramic restorations. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2020;110:103905. doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.103905.

Weber KR, Benetti P, Della Bona Á, Corazza PH, Medeiros JA, Lodi E, et al. How does the piston material affect the in vitro mechanical behavior of dental ceramics? *J Prosthet Dent.* 2018;120(5):747–54. doi: 10.1016/j.prosdent.2018.01.025.

Zhang Y, Kelly JR. Dental Ceramics for Restoration and Metal Veneering. *Dent Clin North Am.* 2017;61(4):797–819. doi: 10.1016/J.CDEN.2017.06.005.