

RESSALVA

Atendendo solicitação do (a) autor
(a), o texto completo desta tese será
disponibilizado a partir de

06/02/2020



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

KAREN CRISTINA ARCHANGELO PERDIGÃO

**EFEITO DA GRADUAÇÃO DO MÓDULO ELÁSTICO NA VIDA ÚTIL E
RESISTÊNCIA DE RESTAURAÇÕES CERÂMICAS**

2017

KAREN CRISTINA ARCHANGELO PERDIGÃO

**EFEITO DA GRADUAÇÃO DO MÓDULO ELÁSTICO NA VIDA ÚTIL E
RESISTÊNCIA DE RESTAURAÇÕES CERÂMICAS**

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, pelo Programa de Pós-Graduação em ODONTOLOGIA RESTAURADORA, Área de Prótese Dentária.

Orientador: Prof. Adj. Alexandre Luiz Souto Borges

São José dos Campos

2017

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2018]. 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).

Perdigão, Karen Cristina Archangelo

Efeito da graduação do módulo elástico na vida útil e resistência de restaurações cerâmicas / Karen Cristina Archangelo Perdigão. - São José dos Campos : [s.n.], 2017.

82 f. : il.

Tese (Doutorado) - - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2017.

Orientador: Alexandre Luiz Souto Borges.

1. Cerâmica. 2. Materiais dentários. 3. Fadiga. 4. Análise de elementos finitos. 5. Restauração dentária permanente. I. Borges, Alexandre Luiz Souto, orient. II. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - Unesp. IV. Universidade Estadual Paulista (Unesp). V. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adj. Alexandre Luiz Souto Borges (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dra. Laís Regiane da Silva Concilio

Universidade de Taubaté (UNITAU)

Campus de Taubaté

Prof. Dr. Fábio da Silva Matuda

Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP)

Campus de São José dos Campos

Prof. Dra. Renata Marques de Melo Marinho

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Guilherme de Siqueira Ferreira Anzaloni Saavedra

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

São José dos Campos, 07 de dezembro de 2017.

DEDICATÓRIA

À Deus, pelo dom da vida, pela sabedoria que me concede a cada dia, por me proporcionar oportunidades de engrandecimento pessoal e profissional. Meu muito obrigada, em especial pelos momentos em que sua presença se fez forte em mim.

Aos meus queridos pais, José Carlos Archangelo e Everly Nara Boamorte José Archangelo, por todo carinho e amor que me dedicam, pelo exemplo como pessoas. Sem vocês nada teria sentido.

Ao meu marido, Eduardo Perdigão, pelo marido carinhoso, companheiro de todos os momentos, pelo amor que nos une, e em especial, por todo apoio que me deu durante estes 3 anos de estudos e toda a compreensão pela minha ausência.

Ao meu irmão Carlos Marcelo Archangelo, pelo companheirismo, pelo amor que nos une e por toda a ajuda na minha vida profissional, e pela sua dedicação à arte de fazer sorrir, que me inspira a querer ser sempre melhor.

Meu muito obrigada a todos vocês, que fazem a minha vida especial.

AGRADECIMENTOS

À **Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho** - UNESP, Campus de São José dos Campos, pela colhida como estudante de doutorado, contribuindo pela minha formação profissional e acadêmica.

Ao **Programa de Pós Graduação em Odontologia Restauradora**, na pessoa do coordenador **Prof. Adj. Dr. Alexandre Luiz Souto Borges**, pela oportunidade concedida. E à **Secretaria de Pós Graduação**, em especial ao **Ivan Damasceno, Bruno Tanaka e Sandra**, por viabilizarem a realização deste doutorado.

Ao meu orientador, querido prof. **Adj. Dr. Alexandre Luiz Souto Borges**, que com muito carinho me acolheu como sua aluna e, com discernimento, conduziu-me e guiou-me neste caminho da pesquisa e docência. A você todo meu respeito, carinho e agradecimento por este breve período em que pude partilhar dos seus ensinamentos e da sua companhia, pois além de professor, carrego um amigo por quem tenho muita estima.

Aos **professores** do Programa de Pós Graduação em Odontologia Restauradora pela contribuição na minha formação acadêmica e científica. De modo carinhoso agradeço aos professores: **Adj. Alexandre Luiz Souto Borges, Dr^a Renata Melo, Adj. Tarcísio de Arruda Paes Junior, Adj. Rubens Nisie Tango**, por dedicarem seu tempo a arte de ensinar.

Aos funcionários do Departamento de Prótese pela disponibilidade em

ajudar, em especial à **Juliane Damasceno**, por sempre me atender com um sorriso e paciência. Aos funcionários do laboratório, **Fernando Fontes**, **Marco Alfredo**. Aos funcionários do Laboratório de Materiais Dentários, **Thais Cachuté Paredella** e **Márcio**, pelo auxílio nas pesquisas e atividades do laboratório. Estendo meus agradecimentos a todos os servidores da UNESP.

Ao professor **Dr. Luiz Felipe Valandro**, pela disponibilidade em ajudar e compartilhar conhecimentos durante a realização deste estudo, e ao colega **Luiz Felipe Guilard** pelo compartilhamento de informações e auxílio. Em especial à **Universidade Federal de Santa Maria** por proporcionar infraestrutura necessária para realização de parte deste estudo.

Ao **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná, IFPR**, Campus Londrina, pela liberação para capacitação profissional em minha área de conhecimento e atuação na docência. Em especial aos meus colegas de trabalho, os professores: **Carlos Marcelo Archangelo**, **Carlos Alexandre Bertoncelo**, **Manoel Martin Junior**, **André Tomazini Gomes de Sá**, pelo apoio e compreensão durante os anos de curso e pelo suporte durante meu período de afastamento. À prof. **Francielle Delgado Agostini**, por me substituir com tanta competência durante o período em que estive ausente.

À **Ivoclar Vivadent**, na pessoa do **Sr. Hebert Mendes**, em especial aos estimados **Daniel Ribeiro** e **Camila Madruga**, pelo auxílio na aquisição de materiais e instruções e orientações repassadas.

Ao **Laboratório de Prótese Odontológica Romanini**, na pessoa do **Sr. José Carlos Romanini**, e especialmente à **Cris** e ao **Flávio**, por gentilmente

ceder o espaço do laboratório e se colocarem à disposição para auxiliar nas etapas laboratoriais da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida, a qual possibilitou a execução deste doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa (FAPESP), pelo auxílio para compra de materiais para execução da pesquisa de doutorado (processo 2014/00668-4).

Aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado para a concretização deste trabalho e que torcem e vibram a cada conquista minha. Aos Meus pais, **José Carlos e Everly**, meu querido irmão **Carlos Marcelo Archangelo**, **Ana Paula**, **Leonardo**, **Rodrigo**, **João Perdigão**, **Maria Lúcia**, **Sandra**, **Andre**, **Luísa**, **Fernando**, **Joseane**, **Júlia**, **Ricardo** e **Juliana**.

Às grandes amigas que este doutorado me proporcionou. Minha amiga de todos os dias, com quem dividi moradia por esses três anos e que me acolheu com muito carinho, fazendo com que a distância e a saudade de casa se tornassem mais amenas, **Aline Barcelos**. Minha amiga de conversas, de partilha, de trabalhos, que em muitos momentos me inspirou com sua dedicação e sabedoria, uma pessoa boa de coração e de alma, a amiga que a vida me presenteou e que fez com que este período se tornasse mais leve e mais alegre, **Gabriela Freitas Ramos**. Minha amiga "arretada", que esteve presente nos momentos mais alegres e divertidos deste doutorado, e que a cada ano comemorávamos juntas nossos aniversários, **Aline Lins Lima**. Daqui

em diante a distância estará presente entre nós, sentiremos saudades, mas fica a certeza de que a amizade é um bem maior e que o amor e o carinho nos unirão sempre.

Às eternas Borgetes, **Anna Karina, Aline Lins, Jéssica Santos, Dayana Campanelli, Tábata Sato, Cristiane Quishida, Marcela Penteado, Ana Carolina de Oliveira Souza**, pelo grupo de estudos e trabalho que juntas partilhamos e pelas pesquisas desenvolvidas no laboratório de estudo de bioengenharia aplicada à odontologia (**GEBAO**). Muito mais que trabalho e pesquisa, tivemos a oportunidade de nos unirmos através de laços de carinho e amizade. À querida **Dayanna**, por todo auxílio em minha pesquisa, pelos dedos lixados, pelas caronas, e, especialmente, pela companhia e amizade. À minhas alunas de Iniciação Científica, **Andréa e Elisa**, pela dedicação ao trabalho e paciência com minhas ausências e falhas. Meu muito obrigada a vocês pelas experiências divididas!

Aos amigos queridos da pós graduação, **Amanda Dal Piva e João Tribst**, pelos momentos de alegria partilhados, pelos trabalhos em conjunto, por serem pessoas especiais. A vida ainda lhes reserva muito sucesso! À querida amiga, **Jaiane Monteiro**, com que dividi meus dias de moradia em São José, por alegrar nossa casa, por esta menina especial que és, pelo apoio e amizade a cada dia.

Aos colegas de pós-graduação, **Jean Soares, Lígia Tiaki Yamamoto, Larissa Alves, Pollyanna Nogueira, Patricia Contreras, Hilton Hiquieri, Vinícius Anéas, Dominique Toyama, Nayara Barqueta, Ana Flávia Reis**, pelas experiências e trabalhos divididos. Foi muito bom conviver com todos vocês.

Às minha amigas de graduação, **Aline Butzke, Francielle Delgado Agotini e Paula Krelling** pela amizade além da distância, pelas risadas, pelo carinho que sempre nos uniu, pelo exemplo de profissionais dedicadas. Obrigada por partilharem comigo meus momentos mais especiais. À Aline, com quem tive o prazer de dividir algumas aulas, lembrando que aluno é sempre aluno nas nossas conversas paralelas. Sua companhia fez falta. À Fran, que estava sempre presente, pra dar uma descontraída nos momentos de estresse, nossas "comilanças" e risadas foram essenciais. À Paula, por dividir as aflições decorrentes do doutorado, por me incentivar, mesmo sabendo que não seria fácil, pelo carinho que nos une, e mesmo na ausência devido às nossas atribulações, tenho certeza que está presente, que torce por mim e que posso contar com você. A vocês, minhas grandes amigas!

A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Meu muito obrigada!

“E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.” (1 Coríntios 13:2)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 ARTIGOS	19
2.1 Artigo – Archangelo KC, Tribst JP, Dal Piva A, Penteadó MM, Borges ALS. Comportamento mecânico de restaurações cerâmicas multicamadas bioinspiradas / <i>Mechanical behavior of bioinspired multilayer restorations.</i>	19
2.2 Artigo – Archangelo KC, Guilardi LF, Campanelli D, Valandro LF, Borges ALS. Resistência à fadiga e análise de elementos finitos de restaurações cerâmicas multicamadas / <i>Fatigue failure load and finite element analysis of multilayer ceramic restorations</i>	32
3 CONSIDERAÇÕES GERAIS	55
REFERÊNCIAS	57
APÊNDICES	60
ANEXO	82

Perdigão KCA. Efeito da graduação do módulo elástico na vida útil e resistência de restaurações cerâmicas [tese]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2017.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição de tensão, resistência, confiabilidade e vida útil de diferentes configurações cerâmicas dispostas em multicamadas, compostas por materiais cerâmicos de módulos de elasticidade distintos, comparando-as a modelos monocamadas. Para o delineamento dos modelos teórico e experimental, foram utilizadas as cerâmicas usinadas, com respectivos módulos elásticos: Feldspática (F): 64 GPa; dissilicato de lítio (L): 95 GPa; Zircônia tetragonal policristalina parcialmente estabilizada por ítrio (Y): 209,3 GPa. No estudo teórico foi utilizada a análise de elementos finitos, e foram desenhados dois modelos em 3D de um primeiro molar superior num software CAD para simular uma restauração monolítica (espessura: 1,5 mm) e uma restauração multicamadas (3 camadas cerâmicas de 0,4 mm + 2 camadas de cimento de 0,15 mm, totalizando de 1,5 mm de espessura). Foram preconizados 3 grupos monolíticos: F, L e Y; e 5 grupos multicamadas: FLY (F + L + Y), FFY (F + F + Y), LLY (L + L + Y), LFY (L + F + Y); YLF (Y + L + F), correspondente ao modelo bioinspirado. Foi aplicada uma carga de 150 N em três áreas de contato na fossa central e a tensão máxima principal (MPS) foi calculada em cada camada. O pico de tensão obtido (MPa) em cada camada de cada grupo foi: F: 10,55; Y: 18,48; L: 12,26; LFY: 25,58/3,96/26,82; LLY: 22,07/7,18/24,04; FFY: 22,58/6,26/28,99; FLY: 20,11/9,68/24,98; YLF: 39,44/7,18/5,42. Desta forma, foi possível constatar que a gradação do módulo elástico, com maior E externamente e menor E na região mais interna, proporcionou menor tensão nas camadas internas da restauração. Com o objetivo de validar os achados, foi proposto o modelo experimental simplificado, no qual foram utilizados discos cerâmicos de espessuras 0,3 mm e 1,5 mm. Os discos de 0,3 mm foram dispostos em 4 camadas, cimentados com cimento químico (Multilink N), e os discos de 1,5 mm não receberam nenhum tratamento, de modo que a espessura final dos espécimes fossem 1,5 mm ($\pm 0,15$ mm). Foram obtidos 6 grupos: F (F: monolítico de 1,5 mm); L (L: monolítico de 1,5 mm); LLFF (L + L + F + F); FFLL (F + F + L + L); YLFF (Y + L + F + F); YLLF (Y + L + L + F). A carga para a fratura foi obtida através do ensaio de flexão biaxial (n=10; 1000 kgf, velocidade 1,0 mm/min) até a ocorrência de falha. Os dados foram analisados através de ANOVA-1 fator e comparações múltiplas de Tukey (5%). O ensaio de flexão biaxial foi também simulado através da análise de elementos finitos para identificar a tensão de tração gerada em cada camada dos grupos. O limite de fadiga (100.000 ciclos; 20 Hz) foi determinado através do método de escada (staircase). A análise de fratura foi realizada através de estereomicroscópio e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram valores de carga para a fratura (N) seguindo a ordem: L ($592,88 \pm 73,78$)^D > FFLL ($319,78 \pm 43,59$)^C > YLLF ($246,75 \pm 24,89$)^B > F ($167,13 \pm 9,84$)^A > YLFF ($166,51 \pm 15,24$)^A > LLFF ($165,46 \pm 22,75$)^A; e limite de resistência à fadiga (N): L ($310,92 \pm 26,73$)^F > FFLL ($190,17 \pm 8,32$)^E > F ($106,21 \pm 2,81$)^D > YLLF ($96,48 \pm 5,73$)^C > YLFF ($89,56 \pm 2,38$)^B > LLFF ($77,23 \pm 6,33$)^A. Ocorreram falhas em

todos os grupos, sendo o local de origem na superfície de tração, coincidente com o local de maior tensão de tração analisado pelo método dos elementos finitos. Desta forma, concluiu-se que o modelo teórico evidenciou melhor desempenho de restaurações bioinspiradas, entretanto, no modelo experimental, a resistência do conjunto foi guiada pelo material na região de tração e a interface adesiva foi um fator limitante, com necessidade de se desenvolver uma estrutura bioinspirada de forma homogênea para validar os achados do modelo teórico.

Palavras-chave: Cerâmica. Materiais dentários. Módulo elástico. Tensão de tração. Fadiga. Análise de elementos finitos.

Perdigão KCA. *Effect of the elastic modulus graduation on the useful life and resistance of ceramic restorations [doctorate thesis].* São José dos Campos (SP): São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2017.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the strength, reliability and useful life of different ceramic configurations arranged in multilayers, composed of ceramic materials with different elastic moduli, comparing them to monolayer models. For the design of the theoretical and experimental models, machined ceramics were used, with respective elastic modulus: feldspathic (F), 64 GPa; lithium disilicate (L), 95 GPa; and Yttrium-partially stabilized tetragonal zirconia (Y-TZP) (Y), 209.3 GPa. In the theoretical study it was used the Finite Element Analyses, Two 3D upper first molar models were generated in CAD software in order to simulate monolayer (1.5 mm thickness) and multilayer restorations (3 ceramic layers of 0.4 mm + 2 cement layers of 0.15 mm, with a final thickness of 1.5 mm). The following groups were obtained: Monolithic groups: F, L and Y; Multilayer groups: FLY (F + L + Y), FFY (F + F + Y), LLY (L + L + Y), LFY (L + F + Y); and a Bioinspired Multilayer group: YLF (Y + L + F). Maximum principal stress (MPS) was calculated on each layer through a load of 150 N in three contact areas in the central fossa. The tensile strength peaks (MPa) were F: 10.55, Y: 18.48, L: 12.26, LFY: 25.58/3.96/26.82, LLY: 22.07/7.18/24.04, FFY: 22.58/6.26/28.99, FLY: 20.11/9.68/24.98 and YLF: 39.44/7.18/5.42. F and L ceramics did not prevent stress dissipation in the inner layers, and Y provided a decrease in tensile stress in the inner layers when used in the outermost layer in ZLF group. Multilayer ceramics with a larger external E modulus and a smaller internal modulus provided less stress in the innermost layers of the restoration. To validate these findings an experimental simplified model was preconized in order to obtain discs of 0.3 mm and 1.5 mm thickness. The 0.3 mm discs were arranged in 4 layers cemented with chemical cement (Multilink N), and the 1.5 mm discs were not treated, in such a way that the final thickness of all specimens was 1.5 mm (± 0.15 mm). The following 6 groups were obtained: F (F: monolithic); L (L: monolithic); LLFF (L + L + F + F); FFLL (F + F + L + L); YLFF (Y + L + F + F); YLLF (Y + L + L + F). The loads to fracture were obtained using the biaxial flexure strength test (1000 kgf, 1 mm/min) until failure and data were analyzed using ANOVA-1 way and Tukey's multiple comparisons (5%). The biaxial bending test was also simulated through finite element analysis (FEA) to identify the tensile stress generated at each layer of the groups. Mean flexural fatigue limits (100,000 cycles; 20 Hz) were determined under stair case approach. The fracture analysis was performed by stereomicroscope and scanning electron microscopy. The load to fracture (N) were obtained as follow L ($592,88 \pm 73,78$)^D > FFLL ($319,78 \pm 43,59$)^C > YLLF ($246,75 \pm 24,89$)^B > F ($167,13 \pm 9,84$)^A > YLFF ($166,51 \pm 15,24$)^A > LLFF ($165,46 \pm 22,75$)^A; and the fatigue limit (N): L ($310,92 \pm 26,73$)^F > FFLL ($190,17 \pm 8,32$)^E > F ($106,21 \pm 2,81$)^D > YLLF ($96,48 \pm 5,73$)^C > YLFF ($89,56 \pm 2,38$)^B > LLFF ($77,23 \pm 6,33$)^A. All the groups presented failures and the origin were located at the tension region of the discs, as encountered in FEA. Thus, it was concluded that the theoretical model showed better performance of bioinspired restorations, however, in the experimental model the material under

tension was mandatory for the resistance of the restoration, the adhesive interface negatively influenced the biomechanical behavior of the multilayer structures and there is a need to develop a homogeneous bio-inspired structure to validate the findings of the theoretical model.

Keywords: Ceramics. Dental Materials. Elastic modulus. Tensile strength. Fatigue. Finite element analysis.

1 INTRODUÇÃO

O dente humano é reconhecidamente uma estrutura complexa, que, além de compor o aparelho mastigatório, apresenta função primordial na estética da face. A perda dentária ainda é um fato recorrente e a reposição de estruturas dentárias recebe grande atenção da área da saúde e de áreas comerciais voltadas ao desenvolvimento de materiais. Nesse sentido, o desenvolvimento de um material que possa substituir completamente o dente humano em relação as suas propriedades biológicas, físicas e mecânicas, ainda não foi possível.

As cerâmicas odontológicas tem sido amplamente utilizadas em tratamentos restauradores devido à excelente estética, biocompatibilidade, estabilidade química, resistência à abrasão, baixo acúmulo de placa e estabilidade de cor (Kelly, 1996). Além disso, a constante otimização de sua microestrutura e de propriedades físicas possibilitou a sua utilização em locais de grande esforço mastigatório como regiões posteriores (Wang et al., 2012).

A resistência mecânica é um importante fator que controla o sucesso clínico das restaurações dentárias. Usualmente, a distribuição de tensões que são introduzidas por compressão, tração e cisalhamento estão presentes nas cerâmicas, sendo difícil a indução de um único tipo de tensão na estrutura. Por conveniência, a resistência à compressão é medida em materiais frágeis, como as porcelanas. Entretanto, estes materiais são muito menos resistentes quando submetidos a forças de tração do que de compressão. Nesse sentido, a resistência à tração é considerada como a propriedade mecânica mais significativa dos materiais cerâmicos, e o principal meio de se detectar o potencial de falha das restaurações (Ban, Anusavice, 1990).

Falhas mecânicas ocorrem quando a tensão aplicada a um material se torna maior que sua resistência (Mecholsky, 1995). As cerâmicas dentárias tendem a falhar com uma deformação crítica de 0,1%, e qualquer aumento de resistência ou tenacidade somente é possível com o aumento do módulo elástico (Rizkalla, Jones, 2004). Entretanto, as cerâmicas são incapazes de reversão de deformação plástica, o que caracteriza um material com tendência a falhas catastróficas (Morena et al., 1986). O grande número de falhas ou trincas preexistentes e a baixa tenacidade à

fratura, limitam a resistência das cerâmicas e causam grande variabilidade nos valores de resistência e no tempo até que ocorra a fratura (Arola, 2017, Danzer et al., 2013). A avaliação dos modos de falhas em estruturas cerâmicas bilaminadas tem demonstrado que o tipo de substrato influencia a propagação do dano, sendo que o início da trinca tende a ocorrer na superfície dos sistemas que apresentam forte interface de união e pequena incompatibilidade plástica-elástica entre os materiais. Já nos materiais com grande incompatibilidade plástica-elástica, o início da trinca tende a ocorrer na interface interna (Bona et al., 2003).

Com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas das cerâmicas, novos materiais com composições e técnicas de processamento diferentes foram introduzidos. Alguns tipos de cerâmicas reforçadas, embora apresentem resistência melhorada em relação às cerâmicas feldspáticas convencionais, ainda apresentam possibilidades de fratura (Santos et al., 2015). Cerâmicas processadas pela tecnologia de fresagem apresentam maior resistência à flexão e menor probabilidade de falhas, dentre elas, cerâmica feldspática sinterizada industrialmente, disponibilizada na forma de blocos, cerâmica de dissilicato de lítio e cerâmica a base de zircônia parcialmente estabilizada por ítria. Desta forma, a tecnologia CAD/CAM (Desenho assistido por computador/ Manufatura assistida por computador) para a fabricação de restaurações dentárias, oferece uma solução aos problemas inerentes à técnica laboratorial tradicional, reduzindo presença de falhas, trincas ou porosidades durante a fabricação das restaurações (Li et al., 2014).

Apesar dos grandes avanços, o desenvolvimento de um material que possa substituir completamente o dente humano, em relação as suas propriedades biológicas e mecânicas ainda não foi possível. Desta forma, restaurações cerâmicas preconizadas sob a perspectiva de novas configurações tem sido propostas, sobretudo restaurações multicamadas, bioinspiradas (Huang et al., 2007; Niu et al. 2008; Niu et al., 2009; Du et al., 2015).

A coroa dentária é uma estrutura graduada composta de matriz mineralizada e reforços orgânicos, que consiste em três estruturas básicas: esmalte, dentina e junção dentina-esmalte (Bajaj, Arola, 2009), os quais apresentam um decréscimo do módulo elástico a partir da região mais externa do dente, para a região mais interna (Zhang et al., 2014). Esta forma de organização proporciona resistência à fratura ao esmalte dentário e evita a propagação de trincas do esmalte em direção à junção

dentina-esmalte, ou seja, a trinca é barrada e não penetra a dentina (Madfa, Yue, 2016).

Em restaurações tradicionais, dispostas em multicamadas, o módulo elástico da cerâmica mais externa varia entre 65 e 300 GPa, enquanto na estrutura de suporte, caracterizada pela dentina, este valor é de 20 GPa. Já o módulo elástico do cimento é de 2 a 13 GPa (Huang et al., 2007). Esta grande diferença nos valores gera um alto nível de tensão entre as estruturas, podendo acarretar trincas radiais na cerâmica de cobertura (Rhabar; Soboyejo, 2011). Esta situação, entretanto, não ocorre no dente natural, o qual apresenta uma estrutura graduada funcionalmente entre esmalte e dentina, com espessura de 10 a 100 μm , que atua como um amortecedor de tensão (Lin et al., 1993). A literatura demonstra, ainda, que a interposição de cimento entre infraestrutura e cerâmica de cobertura aumenta os valores de flexão biaxial em restaurações multicamadas (Costa et al., 2014). Desta forma, as tentativas em se graduar o módulo de elasticidade em materiais com diversas camadas, simulando a condição dentária natural, tem apresentado resultados promissores. Huang et al. (2007), simularam uma estrutura funcionalmente graduada, através da análise de elementos finitos, composta por cerâmica, camada graduada, cimento e polímero semelhante a dentina, da região mais externa para a região mais interna, graduando-se o módulo elástico. Esta estrutura foi comparada aos modelos de um dente natural e de uma coroa cerâmica tradicional, submetidos ao teste de contato Hertziano, sob carga de 120 N. Foi constatado que na coroa tradicional houve uma alta concentração de tensão (tensão máxima principal) na cerâmica dentária, especialmente nas regiões de interface de união entre as camadas, e no modelo graduado, houve uma redução de 30% da tensão máxima principal. Outros estudos (Zhang, Kim, 2009; Zhang et al., 2010) fabricaram uma estrutura graduada utilizando a técnica de infiltração de vidro resultando numa estrutura composta por vidro-zircônica-vidro, submetida aos testes de nanoindentação e teste de flexão por contato. Pode-se observar que, comparado às estruturas controle de zircônia, a carga necessária para a fratura das amostras graduadas foi maior, além de melhora na resistência ao dano por contato, na estética e nas propriedades de cimentação.

Nesse sentido, o objetivo do presente estudo foi investigar a interação e a distribuição de tensão entre materiais cerâmicos dispostos em multicamadas, em

especial no modelo bioinspirado, e compreender o comportamento mecânico, o modo de falha e a origem de fratura em tais estruturas, comparadas com o modelo monolítico.

Desta forma, o primeiro artigo corresponde a um modelo teórico de restaurações cerâmicas em multicamadas, considerando-se a gradação de módulo elástico nas diversas camadas. Através da análise de elementos finitos, foi abordado a distribuição de tensão nas diferentes configurações. Em virtude do melhor desempenho do modelo bioinspirado, foi delineado o segundo artigo, que trata da gradação do módulo elástico num modelo simplificado, utilizando-se discos cerâmicos dispostos em 4 camadas cerâmicas, interpostas por cimento adesivo, com o intuito de validar o conceito de melhor distribuição de tensão através da gradação do módulo elástico mais elevado na região mais externa para a região mais interna da restauração multicamada.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o objetivo de melhorar o comportamento biomecânico de restaurações cerâmicas e mudar os padrões de fratura do material, várias metodologias que levam em consideração restaurações multicamadas tem sido descritas (Lee et al., 2007; Costa et al., 2015; Alessandretti et al., 2017). De modo análogo, o modelo teórico experimental do presente estudo, através da metodologia de elementos finitos utilizando uma restauração em multicamadas, demonstrou melhor distribuição de tensão de tração em modelo bioinspirado, considerando-se a gradação do módulo elástico da região mais externa da coroa para a região mais interna. Desta forma, a simulação de uma arquitetura graduada foi efetiva em melhorar o comportamento biomecânico da restauração.

Contrariamente, o modelo experimental em disco não apresentou o mesmo comportamento. De modo geral, as configurações em monocamadas apresentaram melhores desempenhos, necessitando um valor de carga para a fratura maior do que os modelos multicamadas, tanto no teste monotônico quanto em fadiga. Portanto, o valor de carga para a fratura foi dependente do formato do espécime estudado. O emprego de geometrias planas, como discos, permite a comparação entre os materiais, mas diversos fatores dependentes da geometria podem atuar modificando o padrão de tensão gerado ou as falhas ocorridas em estruturas mais complexas (Hooi et al., 2014). De acordo com Hooi et al. (2014), em ensaio de flexão biaxial é encontrado um valor de carga para a fratura maior para espécimes curvos do que para espécimes planos.

Além disso, no estudo experimental, ao se observar os resultados obtidos fica evidente o melhor desempenho da estrutura monolítica da cerâmica de dissilicato de lítio, tanto no ensaio monotônico, quanto na fadiga. A composição do material cerâmico, aliado à espessura da camada foi determinante para o comportamento obtido para os grupos em multicamadas. Cerâmicas vítreas, com maior quantidade de material amorfo, posicionada em região de tração e espessura fina, como a de 0,3 mm utilizada, proporcionou a propagação da trinca com mais rapidez, enquanto em cerâmicas reforçadas por cristais, estes atuaram como reforço levando a trinca a se defletir por entre os cristais (Santos et al., 2015). Somado a

isto, a cerâmica feldspática é menos susceptível ao crescimento lento de trinca do que a cerâmica de dissilicato de lítio (Ramos et al., 2016), razão pela qual foi obtido melhor desempenho para o grupo monolítico de cerâmica feldspática em relação às configurações multicamadas, especialmente no teste de fadiga.

A interface adesiva também representou um fator a ser considerado, uma vez que a resistência de união entre cimento e cerâmica está relacionada à resistência à fratura das restaurações (May et al., 2012). Apesar de não ter ocorrido delaminações, a diferença entre o módulo elástico do cimento e dos materiais cerâmicos influenciou na resistência final das configurações cerâmicas em multicamadas.

Portanto, apesar do conceito de multicamadas melhorar o desempenho de restaurações cerâmicas num modelo teórico, experimentalmente, este conceito precisa ser aprimorado, no sentido de anular ou minimizar a diferença de módulo elástico entre as camadas cerâmicas, através da utilização de um material que possibilite a constituição de uma estrutura homogênea.

REFERÊNCIAS*

- Alessandretti R, Borba M, Benetti P, Corazza PH, Ribeiro R, Della Bona A. Reliability and mode of failure of bonded monolithic and multilayer ceramics. *Dent Mater.* 2017;33(2):191-197. doi: 10.1016/j.dental.2016.11.014.
- Arola D. *Dent Mater.* 2017 Abr;33(4):367-381. doi: 10.1016/j.dental.2017.01.012.
- Bajaj D, Arola D. Role of prism decussation on fatigue crack growth and fracture of human enamel. *Acta Biomater.* 2009;5:3045–3056. doi: 10.1016/j.actbio.2009.04.013.
- Ban S, Anusavice KJ. Influence of test method on failure stress of brittle dental materials. *J Dent Res.* 1990;69(12):1791-9.
- Bona AD, Anusavice KJ, DeHoff PH. Weibull analysis and flexural strength of hot-pressed core and veneered ceramic structures. *Dent Mater.* 2003;19(7):662-9.
- Costa AK, Borges AL, Fleming GJ, Addison O. The strength of sintered and adhesively bonded zirconia/veneer-ceramic bilayers. *J Dent.* 2014 Out;42(10):1269-76. doi: 10.1016/j.jdent.2014.08.001.
- Costa AK, Kelly RD, Fleming GJ, Borges AL, Addison O. Laminated ceramics with elastic interfaces: a mechanical advantage? *J Dent.* 2015;43(3):335-41. doi: 10.1016/j.jdent.2014.12.012.
- Danzer R, Lube T, Morrell R, Supancic P. Mechanical properties of ceramics. In: Shigeyuki Somiya editor. *Handbook of advanced ceramics: materials, applications, processing, and properties.* Massachusetts: Academic Press; 2013. p. 609-32.
- Du J, Niu X, Soboyejo W. Creep-assisted slow crack growth in bio-inspired dental multilayers. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2015 Jun;46:41-8. doi: 10.1016/j.jmbbm.2015.01.019.
- Hooi P, Addison O, Fleming GJ. Strength determination of brittle materials as curved monolithic structures. *J Dent Res.* 2014 Abr;93(4):412-6. doi: 10.1177/0022034514523621.
- Huang M, Rahbar N, Wang R, Thompson V, Rekow D, Soboyejo WO. Bioinspired design of dental multilayers. *J Mater Sci Eng A.* 2007;464(1–2):315-20.
- Kelly JR, Nishimura I, Campbell SD. Ceramics in dentistry: historical roots and current perspectives. *J Prosthet Dent.* 1996;75(1):18-32.
- Lee JJW, Lloyd IK, Chai H, Jung YG, Lawn BR. Arrest, deflection, penetration and reinitiation of cracks in brittle layers across adhesive interlayers. *Acta Materialia.* 2007;55(17): 5859-66. doi: 10.1016/j.actamat.2007.06.038

* Baseado em: International Committee of Medical Journal Editors Uniform Requirements for Manuscripts Submitted to Biomedical journals: Sample References [Internet]. Bethesda: US.nlm; c2003 [atualizado 04 nov 2015; acesso em 25 jan

Li RW, Chow TW, Matinlinna JP. Ceramic dental biomaterials and CAD/CAM technology: state of the art. *J Prosthodont Res*. 2014 Oct;58(4):208-16. doi: 10.1016/j.jpor.2014.07.003.

Lin CP, Douglas WH, Erlandsen SL. Scanning electron microscopy of type I collagen at the dentin-enamel junction of human teeth. *J Histochem Cytochem*. 1993 Mar;41(3):381-8.

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

May LG, Kelly JR, Bottino MA, Hill T. Effects of cement thickness and bonding on the failure loads of CAD/CAM ceramic crowns: multi-physics FEA modeling and monotonic testing. *Dent Mater*. 2012 Aug;28(8):e99-109. doi: 10.1016/j.dental.2012.04.033.

Mecholsky JJ. Fracture mechanics principles. *Dent Mater*. 1995 Mar;11(2):111-2.

Morena R, Lockwood PE, Fairhurst CW. Fracture toughness of commercial dental porcelains. *Dent Mater*. 1986;2(2):58-62.

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

Niu X, Yang Y, Soboyejo W. Contact deformation and cracking of zirconia/cement/foundation dental multilayers. *J Mater Sci Eng A*. 2008;485(1-2):517-23. doi: 10.1016/j.msea.2007.09.014.

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

Ramos NC, Campos TM, Paz IS, Machado JP, Bottino MA, Cesar PF, Melo RM. Microstructure characterization and SCG of newly engineered dental ceramics. *Dent Mater*. 2016 Jul;32(7):870-8. doi: 10.1016/j.dental.2016.03.018.

Rizkalla AS, Jones DW. Mechanical properties of commercial high strength ceramic core materials. *Dent Mater*. 2004;20(2):207-12.

Santos MJ, Costa MD, Rubo JH, Pegoraro LF, Santos GC Jr. Current all-ceramic systems in dentistry: a review. *Compend Contin Educ Dent*. 2015 Jan;36(1):31-7; quiz 38, 40.

Wang X, Fan D, Swain MV, Zhao K. A systematic review of all-ceramic crowns: clinical fracture rates in relation to restored tooth type. *Int J Prosthodont*. 2012 Set-Out;25(5):441-50.

Zhang Y, Chai H, Lawn BR. Graded structures for all-ceramic restorations. *J Dent Res*. 2010 Apr;89(4):417-21. doi: 10.1177/0022034510363245.

Zhang Y, Kim JW. Graded structures for damage resistant and aesthetic all-ceramic restorations. *Dent Mater*. 2009 Jun;25(6):781-90. doi: 10.1016/j.dental.2009.01.002.

Zhang YR, Du W, Zhou XD, Yu HY. Review of research on the mechanical properties of the human tooth. *Int J Oral Sci*. 2014 Jun;6(2):61-9.