

RESSALVA

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

05/07/2021



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

MARCELA MOREIRA PENTEADO

**PROCESSAMENTO DE VITROCERÂMICAS A BASE DE
DISSILICATO DE LÍTIO COM GRADIENTE FUNCIONAL DE
POROSIDADE**

2019

MARCELA MOREIRA PENTEADO

**PROCESSAMENTO DE VITROCERÂMICAS A BASE DE
DISSILICATO DE LÍTIO COM GRADIENTE FUNCIONAL DE
POROSIDADE**

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 Biomateriais e Novas Tecnologias em Odontologia.

Orientador: Prof. Assoc. Alexandre Luiz Souto Borges

Coorientadores: Prof. Dra. Eliandra de Sousa Trichês (Unifesp)

Prof. Dr. Tiago Moreira Bastos Campos (ITA)

São José dos Campos

2019

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2019]. 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).

Penteado, Marcela Moreira

Processamento de vitrocerâmicas a base de dissilicato de lítio com gradiente funcional de porosidade

/ Marcela Moreira Penteado. - São José dos Campos : [s.n.], 2019.
122 f. : il.

Tese (Doutorado em Odontologia Restauradora) - Pós-Graduação em Odontologia Restauradora - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2019.

Orientador: Alexandre Luiz Souto Borges

Coorientadora: Eliandra de Sousa Trichês

1. Materiais dentários. 2. Dissilicato de lítio. 3. Gradiente de porosidade. 4. Cristalização. I. Borges, Alexandre Luiz Souto, orient. II. Trichês, Eliandra de Sousa, 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. Assoc. Dr. Alexandre Luiz Souto Borges (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Giovani de Oliveira Corrêa

Universidade Estadual de Londrina (UEL)

Faculdade de Odontologia

Prof. Dra. Laís Regiane da Silva Concilio

Universidade de Taubaté (UNITAU)

Campus de Taubaté

Prof. Assist. Dr. Rodrigo Máximo de Araújo

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Assist. 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, 5 de Julho de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico a **Alfredo da Silva Moreira**, um homem inspirador, em que tive oportunidade de chamar de avô. Meu grande exemplo de honestidade, amor à família e trabalho. Como sou grata por cada segundo que estivemos juntos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por direcionar meus caminhos, tirar o medo, conduzir para o bem e sempre me amparar em todas as situações.

À Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp), na pessoa do diretor Prof. Tit. Estevão Tomomitsu Kimpara.

Ao Programa de Pós-graduação em Odontologia Restauradora, na pessoa do coordenador Prof. Adj. Alexandre Luiz Souto Borges. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante o Doutorado. A Unifesp e Ita pela parceria.

Ao meu orientador, professor Adj. Alexandre Luiz Souto Borges, por contribuir de forma tão significativa para meu desenvolvimento como pesquisadora. Sua animação e seu amor pela pesquisa tornaram meus dias mais divertidos. Suas instruções e conselhos me levaram a pensar fora da caixa e desejar mais conhecimento. Muito obrigada pela paciência, confiança e credibilidade nesses anos.

À minha coorientadora, professora Dra. Eliandra de Sousa Trichês, pela paciência em ensinar conceitos básicos da Engenharia de Materiais para uma dentista. Por me receber tão bem no laboratório Bioceram e confiar em mim. Por todo apoio e preocupação. Pelo ombro amigo nos dias difíceis e pela proatividade em me ajudar.

Ao meu coorientador, professor Dr. Tiago Moreira Campos, por ter mergulhado no mundo da Odontologia e assim viabilizar o entendimento de todos os percalços que ocorreram pelo caminho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação que nos impulsionam a fazer um curso de alta qualidade científica e clínica. Em especial ao Prof. Marco

Antonio Bottino e Profa. Renata Marques de Melo, que não medem esforços para nos proporcionar laboratórios de pesquisa excepcionais.

Aos professores da equipe da PPR: Prof. Rodrigo Máximo, Prof. Lafayette Nogueira, Prof. João Maurício Ferraz e Prof. Eduardo Uemura. Eu não poderia ter trabalhado com melhor equipe. Cada um de vocês me recebeu de braços abertos, se dispuseram a ensinar cada detalhe, enxergaram um potencial em mim que eu mesma não percebia, confiaram, me deram grandes oportunidades e parcerias de trabalhos juntos. Meu coração é imensamente grato pelos dias que dividimos laboratório e clínicas, pela amizade e pelos conselhos. Vocês foram minha referência e meu espaço para confiar.

Ao Prof. Eduardo Quinteiro (Unifesp) por todos os pareceres durante a banca no exame de qualificação. À Profa. Laís Regina da Silva Concilio (Unitau) e ao Prof. Guilherme Saavedra pelo aceite em participar da banca de defesa.

Ao Prof. Giovani de Oliveira Corrêa pela orientação durante o meu mestrado e por me apresentar a Unesp de São José dos Campos. Por incentivar demais a minha mudança de cidade e estimular o meu crescimento profissional, sempre destacando as minhas qualidades. Guardo com tanto carinho todos os conselhos e sou muito grata por tamanha consideração.

Aos alunos que tive a oportunidade de desenvolver projetos de iniciação científica: Carlos Zardin Graeff, Hugo Kee Moura, Thamires Carvalho Torres e Gabriela Mizuno Matsuoka. Vocês contribuíram para eu me tornar um pouco mais professora e um pouco mais pesquisadora. Obrigada pela compreensão com o tempo restrito dos nossos encontros e para os aspirantes a engenheiros de materiais, obrigada pela ajuda com diversos passos da minha pesquisa.

Aos amigos de pós-graduação que sabem o alto preço que é pago para conseguir finalizar um curso dessa magnitude e que de alguma forma me incentivaram durante essa caminhada. Meu muito obrigado para: Karen

Archangelo, Aline Barcellos, Jaiane Monteiro, Jean Soares, Gabriela Ramos, Gabriela Nishioka, Jéssica Dias, Aline Lins, Pollyana Nogueira, Jefferson Matos. Em especial à Dayana Morais que não mediu esforços, de perto ou de longe, para transmitir tudo que aprendeu na execução da sua dissertação e torceu muito por bons resultados. À Tabata Sato que tem um coração enorme, que também não cansou em oferecer ajuda, companhia e amizade o tempo todo. Ao Guilherme Schmitt pela amizade paranaense, pela parceria em diversos créditos, pelas conversas intelectuais e pelos churrascos. E ao casal, Amanda Dal Piva e João Tribst, por acreditarem em mim e desenvolverem uma enorme parceria em diversas pesquisas. Por toda torcida nas apresentações, por todas novas ideias, sugestões, premiações que ganhamos juntos e pela amizade.

Aos amigos da Unifesp que sempre foram tão proativos em me ensinar a trabalhar em todos os laboratórios, em especial à Lilian, Verônica, Ana, Lucas e Bruno. Obrigada pela paciência.

À Thaís Cachuté Paradella pelos inúmeros ensaios, pelas ajudas em preparar as amostras e pelas incansáveis tentativas em fazer dar certo. Ao Marcio pela disposição em viabilizar todos os detalhes dentro do laboratório para que tudo funcione bem.

A todos os demais funcionários da UNESP, em especial à Juliana por todo suporte na secretaria, ao Fernando e ao Marco por todo apoio laboratorial em prótese, pela alegria e carinho com cada aluno que passa por esse setor. Ao Carlos Guedes e Michele por toda ajuda na submissão dos projetos.

À minha mãe, Vilma Moreira, que passa por tudo junto comigo, mesmo de longe. Que se for para sofrer ela sofre, se for para se alegrar ela se alegra, mas acima de tudo, com certeza é minha maior intercessora. Obrigada por todas as orações, pelas mensagens todos os dias logo pela manhã. Obrigada por ser minha referência como dentista. A forma com que você atende seus pacientes me encanta

e com certeza alguma coisa me influenciou para que eu gostasse de prótese. Quando eu crescer, quero ser como você.

Ao meu pai, Jefferson Penteado, por estimular a educação continuada, pelas aulas particulares de placas mio-relaxantes e pela admiração ao me ver chegar tão longe.

À minha família Moreira que incentiva e se orgulha de cada passo nessa trajetória profissional. Que festeja em cada conquista, mesmo se for só pelo whats up. Obrigada por fazerem me sentir tão amada. Também agradeço à família Moreira Pontes que agora também faço parte. Obrigada Luci Moreira e Luiz Carlos Pontes, por me acolherem tão carinhosamente na família de vocês, viverem esse doutorado junto comigo e também por confiarem seu filho a viver cada dia ao meu lado.

Ao meu esposo, Nicholas Moreira Pontes, pela preocupação em perguntar todos os dias “como foi seu dia?” e pela tamanha paciência em me ouvir contando todos os detalhes. Por refletirmos, planejarmos, sonharmos e orarmos juntos. Eu sei que não é fácil namorar, noivar e casar com uma doutoranda, mas você tirou de letra e me conquista a cada dia. Obrigada pela paz que você transmite, pelo respeito comigo e por todo amor. Com você ao meu lado, com certeza a caminhada ficou mais fácil.

Agradeço também algumas pessoas que me receberam em São José dos Campos de braços abertos. Ao amigo Dr. Augusto Borsato que me abrigou em sua casa, fez mudança comigo e arrumou um lugar para eu morar. Você foi fundamental para minha adaptação na cidade e seu suporte foi surpreendente. Posso falar que realmente vivi o que fala em Provérbios “Existem amigos mais chegados do que irmãos”. Ao casal Dr. David Franco e Dra. Patrícia Franco que também me acolheram de forma tão querida. Obrigada por todo carinho e por cada detalhe em demonstrar amizade. E à Virgínia Moreira, minha vovó postiça que

sempre me recebia com um sorriso no rosto, dava bronca se eu ficasse muito tempo sem visitá-la, deixava o pão moreninho, lotava os potes de chocolate e de bala de goma só para me agradar. O amor da senhora foi muito importante para eu me sentir em casa, mesmo longe da minha família.

Meus sinceros votos para que Deus abençoe cada um de vocês.

“Como a cerâmica, somos frágeis, falhos e quebradiços. Mas Deus irá nos usar, se permitimos que Ele trabalhe, por meio das nossas fraquezas”.

Rick Warren

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
RESUMO	16
ABSTRACT	18
1 INTRODUÇÃO	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1 Materiais cerâmicos odontológicos	25
2.2 Síntese do material cerâmico.....	28
2.3 Microestrutura do dente natural	32
2.4 Materiais funcionalmente gradados	34
3 PROPOSIÇÃO	36
3.1 Objetivo geral	36
3.2 Objetivo específicos	36
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
4.1 Material	37
4.2 Métodos	38
4.2.1 Análise por elementos finitos (AEF).....	38
4.2.2 Preparação do vidro.....	41
4.2.3 Caracterização do vidro.....	44
4.2.3.1 Difração de raios-x (DRX).....	44
4.2.3.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC).....	45
4.2.3.3 Distribuição Granulométrica	45
4.3 Obtenção da vitrocerâmica à base de dissilicato de lítio por <i>gel casting</i>.....	45
4.4 Obtenção da vitrocerâmica à base de dissilicato de lítio por prensagem... ..	47
4.5 Preparação da vitrocerâmica em gradiente funcional de porosidade	47
4.6 Obtenção da vitrocerâmica à base de dissilicato de lítio reforçada com YTZP	48
4.7 Preparação da vitrocerâmica reforçada por YTZP com gradiente funcional de porosidade	50

4.8	Obtenção da vitrocerâmica reforçada por silicato de zircônio.....	50
4.9	Sinterização das cerâmicas experimentais.....	51
4.10	Caracterização das vitrocerâmicas à base de dissilicato de lítio, reforçada por YTZP e reforçada por SZ, densas e gradadas	53
4.10.1	Difração de raios-X (DRX)	53
4.10.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por emissão de campo (FEG)	54
4.10.3	Densidade e porosidade aparente	54
4.11	Avaliação do comportamento mecânico das vitrocerâmicas à base....	55
	de dissilicato de lítio, reforçada por YTZP e reforçada por SZ, densas e gradadas	55
4.11.1	Determinação da resistência à flexão biaxial.....	55
4.11.2	Análise fractográfica	56
4.11.3	Determinação do módulo de elasticidade.....	56
4.12	Análise estatística	57
5	RESULTADO	58
5.1	Análise em elementos finitos (AEF).....	58
5.2	Preparação das vitrocerâmicas experimentais.....	61
5.2.1	Caracterização do vidro e das vitrocerâmicas experimentais	61
5.2.1.1	Difração de raios-x	61
5.2.1.2	Análise térmica	67
5.2.1.3	Distribuição Granulométrica	77
5.3	Caracterização das vitrocerâmicas à base de dissilicato de lítio produzidas por <i>gel casting</i> e prensagem.....	77
5.4	Avaliação do comportamento mecânico das vitrocerâmicas à base de dissilicato de lítio produzidas por <i>gel casting</i> e prensagem.....	80
5.5	Caracterização das vitrocerâmicas à base de dissilicato de lítio, reforçada por YTZP e por SZ.....	81
5.5.1	Microscopia eletrônica de varredura	81
5.5.2	Densidade e porosidade	84
5.5.3	Avaliação do comportamento mecânico das vitrocerâmicas à base de dissilicato de lítio, reforçada por YTZP e SZ, densas e gradadas	84

5.5.3.1 Resistência à flexão biaxial	85
5.5.3.2 Análise fractográfica	86
5.5.3.3 Determinação do módulo de elasticidade.....	88
6 DISCUSSÃO	91
7 CONCLUSÃO	98
REFERÊNCIAS	99
ANEXO	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEF	Análise em elementos finitos
Al_2O_3	Óxido de alumínio (Alumina)
B_2O_3	Trióxido de bório
CAD	Computer Aided Design – Desenho assistido por computador
CAE	Computer Aided Engineering – Engenharia assistida por computador
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
DL	Dissilicato de lítio
DLGrad	Grupo controle graduado a base de dissilicato de lítio
DRX	Difração de raios-x
E	Módulo elástico
FEG	Microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo
GDL	Grupo controle denso a base de dissilicato de lítio
GPa	Giga Pascal
GY	Grupo de vitrocerâmica densa reforçada por YTZP
JAD	Junção amelo-dentinária
K_2O	Óxido de potássio
Li_2CO_3	Carbonato de lítio
Li_2O	Óxido de lítio
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MgO	Óxido de magnésio
ML	Metassilicato de lítio
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
NaO	Óxido de sódio
P_2O_5	Pentóxido de fósforo

Pa	Pascal
PREN	Prensagem
SiO ₂	Dióxido de silício
SZ	Silicato de zircônio
T _g	Temperatura de transição vítrea
T _c	Temperatura de cristalização
T _m	Temperatura de fusão
YTZP	Grupo zircônia tetragonal parcialmente estabilizada por ítrio
YTZPGrad	Grupo de vitrocerâmica gradada reforçada por YTZP
ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	Zircônia tetragonal parcialmente estabilizada por óxido de ítrio
ZrSiO ₄	Silicato de zircônio

Penteado MM. Processamento de vitrocerâmicas a base de dissilicato de lítio com gradiente funcional de porosidade [tese]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2019

RESUMO

O desempenho das cerâmicas odontológicas é um aspecto bastante explorado na literatura, uma vez que o aprimoramento das suas características permite desenvolver materiais com maior longevidade. Trincas, delaminações, lascamentos e fraturas catastróficas são as falhas mais encontradas em restaurações cerâmicas. O objetivo dessa pesquisa foi conhecer o comportamento mecânico de coroas monolíticas gradadas e avaliar a possibilidade de produzir uma vitrocerâmica experimental a base de dissilicato de lítio com gradiente funcional de porosidade. Este trabalho foi dividido em duas partes: a primeira, teórico/computacional e a segunda, a fabricação do produto. 1) Através de software CAD foi modelado um molar inferior com preparo tradicional para coroa total e uma coroa total monolítica com camada de cimento resinoso entreposto. Quatro grupos foram compostos pela variação da composição das coroas totais: Coroa rígida ($E=80$ GPa), flexível ($E=30$ GPa), gradação bioinspirada (de 80 até 30 GPa) e gradação inversa (de 30 até 80 GPa). O modelo foi exportado para o software de análise. Os materiais foram considerados isotrópicos, linearmente elásticos e homogêneos, com contatos ideais. Uma força de 300N foi aplicada na face oclusal, a base do modelo foi fixada em todas as direções. A tensão máxima principal, tensão de Von-Mises e deslocamento foram utilizadas para observar o comportamento mecânico. 2) Uma mistura de óxidos foi homogeneizada e submetida à fusão. As fritas obtidas por resfriamento foram moídas e passaram por diferentes tratamentos térmicos, seguido das análises de DSC e DRX. Seis grupos experimentais foram obtidos: DL-E (vitrocerâmica densa a base de dissilicato de lítio simulando esmalte); DL-D (vitrocerâmica densa a base de dissilicato de lítio simulando dentina); DLGrad (vitrocerâmica gradada a base de dissilicato de lítio); YTZP-E (vitrocerâmica densa reforçada por YTZP simulando esmalte); YTZP-D (vitrocerâmica densa reforçada por YTZP simulando dentina); YGrad (vitrocerâmica gradada reforçada por YTZP). Suspensões aquosas contendo 23 e 30%-vol. de pó de vidro foram preparadas e submetidos à técnica de *gel casting* para formar um gradiente funcional. As vitrocerâmicas com e sem gradiente funcional de porosidade foram caracterizadas pelas técnicas de DRX, FEG, densidade e porosidade aparentes. Também foram realizados ensaios mecânicos de resistência à flexão biaxial e fractografia. Os resultados obtidos foram estatisticamente avaliados por Anova 1 fator e Tukey ($p<0,05$). As micrografias mostraram formação de gradiente funcional de porosidade apenas

nas vitrocerâmicas a base de dissilicato de lítio. Não houve diferença entre as densidades de todas as vitrocerâmicas estudadas, porém YTZP-E, YTZP-D e YTZP-Grad apresentaram porosidade 10% maior do que as vitrocerâmicas sem zircônia. Os defeitos críticos na superfície das vitrocerâmicas são semelhantes em todas as condições estudadas, porém a aleatoriedade de poros internos das vitrocerâmicas contendo YTZP proporcionaram diminuição da resistência à flexão, com diferença estatisticamente significativa em relação às vitrocerâmicas sem YTZP. Entre as vitrocerâmicas densas e gradadas não houve diferença na resistência à flexão. Conclui-se que a adição de zircônia em sistema a base de $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O}$ alterou a temperatura de sinterização, o padrão de porosidade, a resistência flexural e comprometeu a formação do gradiente funcional de porosidade. O comportamento mecânico das vitrocerâmicas à base de dissilicato de lítio densas e gradadas são similares.

Palavras-chave: Materiais dentários. Dissilicato de lítio. Gradiente de porosidade. Cristalização.

Penteado MM. Processing of glass-ceramic based of lithium disilicate with functional gradient of porosity [doctorate thesis]. São José dos Campos (SP): São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2019.

ABSTRACT

The performance of dental ceramics is very explored at literature, once the enhancement of yours features allow the development of materials with higher longevity. Cracks, delamination, chipping and catastrophic fracture are the faillores most finds at ceramics restorations. The aim of this research was knew the mechanical behavior of monolithics graded crows and it was evaluated the possibility to produce a glass ceramic based of lithium disilicate with gradient of porosity. This research was divided into two parts: the first one, theoretical computational and the second, the manufacturing product. 1) Using a CAD software, a lower molar received a full-crown preparation. The monolithic crown was modeled with a resin cement layer of 0.1 mm. Four groups were distributed according to the full crown elastic modulus (E):(a)Bioinspired crown with regressive elastic gradation (from 80 to 30 GPa); (b) Crown with regressive elastic gradation (from 30 to 80 GPa); (c) Rigid crowns and (d) Flexible crown. The model was exported to the analysis software and meshed into 385,240 tetrahedral elements and 696,310 nodes. Materials were considered isotropic, linearly elastic, and homogeneous, with ideal contacts. A 300-N load was applied at the occlusal surface and the base of the model was fixed in all directions. The results were required in Maximum principal stress, Von-Mises Stress and Displacement. 2) A mixture of oxides was homogenized and it was melted at fusion. The glass frits get by cooling were grinded and passed through heat treatment accordin to CSD and RXD. Six groups were obtained: DL-E (glass ceramic dense based of lithium disilicate simulating enamel); DL-D (glass ceramic dense based of lithium disilicate simulating dentin); DL-Grad (glass ceramic graded based of lithium disilicate); YTZP-E (glass ceramic dense reforced by YTZP simulating enamel); YTZP-D (glass ceramic dense reforced by YTZP simulating dentin); YTZP-Grad (glass ceramic graded and reforced by YTZP). Twenty-three and 40% of glass powder were prepared through dispersion water and it was submitted for techniqe of gel casting to form functional gradient. The samples with and without functional gradient of porosity were characterized by RXD, FEG, density and porosity apparent. They were passed to mechanical tests of flexural strength and fractograpy. The results were statistic evaluated by Anova 1 factor and Tukey ($p < 0,05$). The micrographys show development of functional gradient of porosity only ate groups based of lithium disilicate. There is no difference between density of all the groups, however YTZP-E, YTZP-D and YTZP-Grad showed porosity

10% greater the groups without zirconia. The critical flaw at surface of the ceramics were similar to the groups, however the random of internal pores at groups with YTZP get the flexural strength lower, with statistical difference with the groups without YTZP. Among the dense and graded groups were not statistical differences at flexural strength. It concluded that add of zirconia at ceramic system based of $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O}$ changed the temperature of sintering, the standard of porosity, flexural strength and compromised the development of functional gradient of porosity. The mechanical behavior of ceramics based at lithium disilicate dense and graded were similar.

Keywords: Dental materials. Gradient. Crystallization.

1 INTRODUÇÃO

A cerâmica odontológica é um material frequentemente utilizado nos casos de reabilitação oral. Muitos estudos sobre a falha desses materiais são realizados no sentido de aprimorá-los (Anusavice 2012; Sonza et al., 2014; Zhang et al., 2016). Basicamente os esforços estão em conter as trincas originadas em defeitos estruturais inerentes ao material, que se propagam quando em uso. (2016). A etiologia das falhas está associada a diversos fatores como espessura da cerâmica (Benetti et al., 2011), incompatibilidade térmica entre as cerâmicas de infra-estrutura e de cobertura (Benetti et al., 2010, 2013), formato inadequado da coroa (Corazza et al., 2013), problemas de processamento principalmente na sinterização e resfriamento (Guazzato et al., 2010; Tholey et al., 2011; Benetti et al., 2014).

O princípio das restaurações *metal free* surgiu a partir das coroas metalocerâmicas até então bem estabelecidas (Zarone et al., 2011). As coroas apresentam infra-estrutura de cerâmica extremamente rígida como a zircônia ou alumina, que ajuda a reduzir o índice de fratura catastrófica das restaurações, mas que são desfavoráveis no aspecto estético (Benetti et al., 2014; D´Arcangelo et al., 2016). Para contornar esta desvantagem é aplicada uma camada com outro tipo de cerâmica como feldspática, leucita ou dissilicato de lítio para obter ganho nas características ópticas (Lee et al., 2015).

Em contrapartida, o dente natural composto por esmalte e dentina contém uma junção entre esses dois componentes que transita a partir de uma estrutura com módulo elástico maior, para outra de módulo elástico menor, de forma gradual (Du et al., 2013). Essa combinação é responsável pela maior rigidez ao sistema, mantendo-o sem fraturas em situações de uso dentro da normalidade (Al-Maqtari et al., Coldea et al., 2014). A partir desse conceito, surgiram os materiais

bio-inspirados com gradiente funcional em multicamadas que apresentam melhor distribuição de tensão, principalmente na cerâmica de cobertura, evitando que haja fratura na região de contato oclusal (Du et al., 2013, 2015). Também surgiram as coroas monolíticas produzidas por um único material, as quais dispensam a camada de cobertura tradicionalmente utilizada até então. Essa prática diminui o estresse residual e evita delaminações, porém nem sempre atende as exigências estéticas de acordo com as condições do remanescente dental (Schwindling et al., 2017).

A literatura contemporânea compartilha o conceito biomimético como uma tendência de desenvolver novos materiais que possam reproduzir o comportamento mecânico e estético dos dentes naturais (Kelly et al., 2011; Magne et al., 2012; Schlichting et al., 2014). Para isso, é necessário amplo conhecimento da composição e da microestrutura personalizada das cerâmicas vítreas responsável pelos aspectos de resistência, dureza e estética (Huang et al., 2017). Muitos achados estão disponíveis na literatura em relação ao dissilicato de lítio, alumina e zircônia (Demir et al., 2014; Lawsona et al., 2016; Fabris et al., Teichmann et al., 2017).

O dissilicato de lítio é uma cerâmica que desperta bastante interesse devido às suas características óticas semelhantes a um dente natural (Kelly et al., 2011) e suas boas propriedades mecânicas. Essa associação o mantém como destaque de material restaurador promissor (Höland et al., 2006a). Atualmente o sistema comercial IPS Emax oferece duas técnicas para manuseio: cera perdida (IPS Emax Press) e CAD/CAM (IPS Emax CAD). Ambas podem produzir infraestruturas que posteriormente são envolvidos por uma camada de cerâmica feldspática (IPS Emax Ceram) ou podem fabricar coroas puramente monolíticas (Ivoclar Vivadent AG (Catálogo 06/2009); Alkadi, Ruse, 2016).

A limitação do dissilicato de lítio é a resistência considerada baixa em relação a outras cerâmicas como alumina ou zircônia. Essa característica torna a

coroa mais suscetível à fratura em condições de fadiga, em contrapartida apresenta características de rigidez mais próxima ao remanescente dental, o que pode evitar a fratura exatamente desse remanescente (Homaei et al., 2016). Inicialmente era indicada apenas para dentes anteriores, mas com o desenvolvimento dos novos sistemas, o dissilicato de lítio e é utilizado também em coroas posteriores (Alkadi, Ruse, 2016). Uma das abordagens lançadas para aprimorar a resistência à fadiga desse material é o reforço com partículas de zircônia distribuídas de forma homogênea (Höland et al., 2006b; Apel et al., 2007; Ramos et al., 2016). A VITA Suprinity (VITA) e a Celtra Due (Dentsply Sirona) surgiram para aplicar esse conceito, apresentando uma cerâmica à base de silicato de lítio reforçado por zircônia, a qual oferece translucidez adequada associada com propriedades mecânicas favoráveis (Denry, Kelly, 2014).

Já a zircônia é a cerâmica mais resistente no âmbito odontológico e, portanto, apresenta alto módulo de elasticidade (Zarone et al., 2010). Morfologicamente apresenta-se em 3 fases polimórficas: monoclinica, cúbica e tetragonal. Essas fases são determinadas pela diferença de equilíbrio na estrutura cristalina, o que ocorre com alteração de temperatura. Em seu estado puro e em temperatura ambiente apresenta-se na fase cristalina monocíclica, porém com a elevação da temperatura em torno de 1170°C transforma-se em tetragonal e acima de 2340°C em cúbica. O resfriamento gera expansão volumétrica e consequente formação de fendas na cerâmica. Para evitar esse comportamento, adiciona-se alguns óxidos como o CaO, MgO, CeO₂, Y₂O₃ que estabilizam a reação expansiva (Sundh et al., 2014).

Apesar da diversidade na composição das cerâmicas odontológicas, os conceitos biomiméticos associados com gradiente funcional despertam grande interesse nas pesquisas contemporâneas. Há relatos de que um gradiente funcional de concentração de infiltrado com coeficiente de expansão térmico e Poisson similares à cerâmica base pode aumentar a superfície vítrea sem introduzir tensão

residual, pois o módulo elástico mais baixo dissipa tensão de flexão, tração e compressão, diminuindo a formação de trincas por deslizamento (Suresh et al., 1997; Jitcharoen et al., 1998; Zhang, Kim, 2009).

Dessa forma, a disposição das camadas de dentina e esmalte nos dentes naturais inspiram a produção de cerâmicas gradadas. O gradiente funcional almejado é a criação de um material, com uma composição única, que apresente diferenças de rigidezes em seu interior (Marshall et al., 2001), sem apresentar problemas de interface durante a sinterização.

A forma mais utilizada para produzir cerâmicas odontológicas e que possibilita a criação de um gradiente funcional é a prensagem. O método permite que a pressão compacte o pó cerâmico, deforme as partículas através do atrito e as reorganize. A sinterização resulta em um compacto com propriedades mecânicas favoráveis (Dong et al., 1992; Hallman et al., 2018). Outra alternativa, utilizada na área de Engenharia para produção de materiais é o *gel-casting*, um processo coloidal que polimeriza macromoléculas de monômeros orgânicos em gel dispostos em suspensão com partículas cerâmicas. O resultado é um veículo de baixa viscosidade passível de ser vertido em moldes com a geometria almejada. Conforme ocorre a secagem, redes 3D de polímeros em gel são formadas através das reações entre os monômeros e o produto final supera limitações de outras técnicas (Omatete et al., 1997; Gilissen et al., 2002), como por exemplo a redução da formação de poros (Prabhakaran et al., 2009; Falkowski et al., 2010; Yang et al., 2011). Além de oferecer alto rendimento, demanda menos tempo e apresenta custo baixo (Gilissen et al., 2002; Yang et al., 2011).

Diante das diversas opções de cerâmicas e de técnicas de manufatura das coroas, a decisão de qual material utilizar é individual para cada caso, de acordo com a maior necessidade de resistência ou de estética (Della Bona, Kelly, 2008; Seydler, Schmitter, 2015). Apesar de todas as soluções disponíveis atualmente,

deparar-se com um material resistente e estético concomitantemente, com longevidade extensa, ainda é um desafio.

A partir de lacunas na literatura, surgiram alguns questionamentos sobre a produção de cerâmicas odontológicas: 1) Qual a real influência da zircônia em um sistema a base de dissilicato de lítio? 2) O método de processamento pode influenciar nas características e nas propriedades mecânicas das cerâmicas? 3) Uma cerâmica na forma gradada pode ter comportamento mais favorável do que as cerâmicas densas?

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo conhecer o comportamento mecânico de coroas monolíticas gradadas e avaliar a possibilidade de produzir uma vitrocerâmica experimental a base de dissilicato de lítio com gradiente funcional de porosidade.

7 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nessa pesquisa, pode concluir que:

- a) Em relação aos resultados de análise por elementos finitos, o arranjo de gradação de módulo elástico em coroas monolíticas modifica a distribuição de tensões nas restaurações e o conceito de bioinspiração apresentou resultados promissores em relação a menor concentração de tensão no remanescente dentário;
- b) A adição de $ZrO_2-Y_2O_3$ ou $ZrSiO_4$ proporcionam diminuição na resistência flexural das vitrocerâmicas, devido a modificação na micro estrutura e a menor densificação;
- c) O método de processamento de prensagem ou *gel casting* não influenciou na micro estrutura das vitrocerâmicas;
- d) O processamento por *gel casting* pode produzir vitrocerâmica com maior resistência flexural;
- e) A diferença da quantidade de sólidos na suspensão para realizar *gel casting* foi capaz de criar um gradiente de rigidez;
- f) A gradação de vitrocerâmicas monolíticas não aprimora a resistência à flexão das vitrocerâmicas, mas pode ser uma alternativa promissora para o remanescente dentário.

REFERÊNCIAS*

Alavi AA, Behrooxi Z, Eghba FN. The shear bond strength of porcelain laminate to prepared and unprepared anterior teeth. *J Dent Shiraz Univ Med Sci.* 2017;18(1): 50-5.

Alkadi L, Ruse ND. Fracture toughness of two lithium disilicate dental glass ceramics. *J Prosthet Dent.* 2016; 116(4):591-6.

Al-Maqtari AA, Razak AAA, Hamdi M. 3D Finite element analysis of functionally graded multilayered dental ceramic cores. *Dent Mater J.* 2014; (33)4:458-65.

Amer R, Kürklü D, Johnston W. Effect of simulated mastication on the surface roughness of three ceramic systems. *J Prosthet Dent.* 2015;114(2):260-5.

Anusavice KJ. Standardizing failure, success, and survival decisions in clinical studies of ceramic and metal-ceramic fixed dental prostheses. *Dental Mater J.* 2012; 28(1):102-11.

Apel E, Hoen CV, Rheinberger V, Höland W. Influence of ZrO₂ on the crystallization and properties of lithium disilicate glass-ceramics derived from a multi-component system. *J Eur Ceram Soc.* 2007; 27(2-3):1571–7.

Arola DD, Gao S, Zhang H, Masri R. The tooth: its structure and properties. *Dent Clin North Am.* 2017; 61(4):651-68.

Bai Y, Peng L, Zhu Q, Hao Z. Non-isothermal crystallization kinetics of stoichiometric lithium disilicate-based glasses with Al₂O₃ additives. *J Non-Cryst Solids* 2016;445-446:116-22.

Bai Y, Peng L, Zhu Q. The preparation of the lithium disilicate glass-ceramic with high translucency. *J of Non-Cryst Solids* 2017;457:129-34.

Beall GH. Design and properties of glass-ceramics. *Annu Rev Mater Sci.* 1992;22:91-119.

Benetti P, Kelly JR, Della Bona A. Evaluation of thermal compatibility between core and veneer dental ceramics using shear bond strength test and contact angle measurement. *Dent Mater J.* 2010;26(8):743–50.

* Baseado em: International Committee of Medical Journal Editors Uniform Requirements for Manuscripts Submitted to Biomedical journals: Sample References [Internet]. Bethesda: US NLM; c2003 [cited 2019 Jan 2019]. U.S. National Library of Medicine; [about 6 p.]. Available from: http://www.nlm.nih.gov/bsd/uniform_requirements.html

Benetti P, Pelogia F, Valandro LF, Bottino MA, Della Bona A. The effect of porcelain thickness and surface liner application on the fracture behavior of a ceramic system. *Dent Mater J*. 2011;27(9):948–53.

Benetti P, Kelly JR, Della Bona A. Analysis of thermal distributions in veneered zirconia and metal restorations during firing. *Den Mater J*. 2013; 29(11):1166–72.

Benetti P, Kelly JR, Sanchez M, Della Bona A. Influence of thermal gradients on stress state of veneered restorations. *Dent Mater J*. 2014; 30:554-63.

Blatz MB, Sadan A, Kern M. Resin-ceramic bonding: a review of the literature. *J Prosthet Dent*. 2003; 89(3):268-74.

Burgess JO. Fracture load of ceramic restorations after fatigue loading. *J Prosthet Dent*. 2015;114(2):266-71.

Cadioli LP, Baitelo LG. Materiais cerâmicos: um estudo sobre vitrocerâmico. *Rev Ciênc e Tecnol*. 2009;4(4):147-61.

Callister Jr WD, Rethwisch DG. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC; 2016.

Coldea A, Swain MV, Thiel N. Hertzian contact response and damage tolerance of dental ceramics. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2014; 34:124-33.

Corazza PH, Feitosa AS, Borges AL, Della Bona A. Influence of convergence angle of tooth preparation on the fracture resistance of Y-TZP-based all-ceramic restorations. *Dent Mater J*. 2013;29(3):339–47.

Costa AK, Borges AL, Fleming GJ, Addison O. The strength of sintered and adhesively bonded zirconia/veneer-ceramic bilayers. *J denti* 2014;42(10):1269-76.

Craig RG, Powers JM. *Materiais dentários restauradores*. São Paulo: Santos; 2004.

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.

D'Arcangelo C, Vanini L, Rondoni GD, De Angelis F. Wear properties of dental ceramics and porcelains compared with human enamel. *J Prosthet Dent.* 2016; 115(3): 350-5.

Della Bona A, Anusavice KJ. Microstructure, composition, and etching topography of dental ceramics. *Int J Prosthodont.* 2002;15(2):159-67.

Della Bona A, Borba M, Benetti P, Cececchetti D. Effect of surface treatments on the bond strength of a zirconia-reinforced ceramic to composite resin. *Braz Oral Res* 2007; 21(1):10-5.

Della Bona A, Kelly JR. The clinical success of all-ceramic restorations. *J Am Dent Assoc.* 2008;139(suppl):8S-13S.

Demir N, Ozturk NA, Malkoc MA. Evaluation of the marginal fit of full ceramic crowns by the microcomputed tomography (micro-CT) technique. *Eur J Dent* 2014; 8-4:437-44.

Denry I, Holloway JA. Ceramics for dental applications: a review. *Dent Mater J.* 2010;3:351-68.

Denry I, Kelly JR. Emerging ceramic-based materials for dentistry. *J Dent Rest.* 2014;93(12):1235-42.

Deubener J, Bruckner R, Sternitzke M. Induction time analysis of nucleation and crystal growth in di and metasilicate glasses. *J Non-Cryst Solids* 1993;163:1-12.
Dittmer M, Ritzberger C, Schweiger M, Rheinberger V, Worle M, Holand W. Phase and microstructure formation and their influence on the strength of two types of glass-ceramics. *J Non-Cryst Solids* 2014; 382: 55-60.

Dong JK, Luthy H, Wohlwend A, Schärer P. Heat-Pressed Ceramics: technology and strength. *Int J Prosthodont.* 1992;5(1):9-16.

Du J, Niu X, Rahbar N, Soboyejo W. Bio-inspired dental multilayers: effects of layer architecture on the contact-induced deformation. *Acta Biomater* 2013; 9(2):5273-9.

Eldafrawy M, Nguyen JF, Mainjot AK, Sadoun MJ. A functionally graded PICN material for biomimetic CAD-CAM Blocks. *J Dent Res.* 2018;97(12):1324-30.

Fabris D, Souza JCM, Silva FS, Fredl M, Guimarães, JM, Zhang Y, et al. Thermal residual stresses in bilayered, trilayered and graded dental ceramics. *Ceram Int*. 2017; 43(4):3670-8.

Falkowski P, Bednarek P, Danelska A. Application of monosaccharides derivatives in colloidal processing of aluminum oxide. *J Eur Ceram Soc*. 2010;30(14):2805–11.

Ge C, Green CC, Sederstrom D, McLaren EA, White SN. Effect of porcelain and enamel thickness on porcelain veneer failure loads in vivo. *J Prosthet Dent*. 2014;111(4):380-7.

Giordano R, Pelletier L, Pober R. Flexural strength of an infused ceramic, glass ceramic, and feldspathic porcelain. *J Prosthetic Dent*. 1995;73(5):411–18.

Giordano R, McLaren EA. Ceramicis overview: classification by microstructure and processing methods. *Compend Contin Educ Dent Suppl*. 2010; 31(9):682:97.

Gomes E, Assunção WG, Rocha EP, Santos PH. Cerâmicas odontológicas: o estado atual. *Cerâmica* 2008;54(331):319–25.

Gracis S, Thompson VP, Ferencz JL, Silva NR, Bonfante EA. A new classification system for all-ceramic and ceramic-like restorative materials. *Int J Prosthodont*. 2015;28(3):227–35.

Guazzato M, Walton TR, Franklin W, Davis G, Bohl C, Klineberg I. Influence of thickness and cooling rate on development of spontaneous cracks in porcelain/zirconia structures. *Aust Dent J*. 2010;55(3):306–10.

Headley TJ, Loehman RE. Crystallization of a glass-ceramic by epitaxial growth. *J Am Ceram Soc*. 1984;67(620):81-4.

Höland W, Rheinberger V, Apel E, Hoen CH, Höland M, Dommann A, et al. Clinical applications of glass-ceramics in dentistry. *J Mater Sci Mater Med*. 2006;17(11):1037–42.

Höland W, Apel E, Hoen CH, Rheinberger V. Studies of crystal phase formations in high-strength lithium disilicate glass-ceramics. *J Non-Cryst Solids* 2006; 352(38-39):4041–50.

Homaei E, Farhangdoost K, Tsoib JKH, Matinlinna JP, Pow EHN. Static and fatigue mechanical behavior of three dental CAD/CAM ceramics. *J Mech Behav of Biomed Mater* 2016; 59:304-13.

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.

Huang S, Zujovic Z, Huang Z, Gao W, Cao P. Crystallization of a high-strength lithium disilicate glass-ceramic: na XRD and solid-state NMR investigation. *J Non-Cryst Solids* 2013;457:65-72.

Huang S, Ying Lia, Shanghai W, Zhaohui H, Gaoa W, Caoa P. A novel high-strength lithium disilicate glass-ceramic featuring ahighly intertwined microstructure. *J Eur Cermic Soc*. 2017; 37(3):1083-94.

Jian T, Tang MV, Swain X, Wang KZ. Effect of core ceramic grinding on fracture behavior of bilayered zirconia veneering ceramic systems under two loading schemes. *Dental Mater J*. 2016; 32(12):1453-63.

Jitcharoen J, Padture NP. Hertzian–Crack suppression in ceramics with elastic-modulus-graded surfaces. *J Am Ceram Soc* 1998; 81(9):2301–8.

Jongsma LA, de Jager N, Kleverlaan CJ, Pallay P, Feilzer AJ. Shear bond strength of three dual-cured resin cements to dentin analyzed by finite element analysis. *Dent Mater J*. 2012;28:1080-8.

Kelly JR, Benetti P. Ceramic materials in dentistry: historical evolution and current practice. *Aust Dent J*. 2011;56(suppl 1):84-96.

Lawson NC, Bansal R, Burgess JO. Wear, strength, modulus and hardness of CAD/CAM restorative materials. *Dent Mater J*. 2016; 32(11):e275-83.

Lee Y-K. Translucency of human teeth and dental restorative materials and its clinical relevance. *Journal of Biomedical Optics* 2015; 20(4): 045002-1-8. doi.org/10.1117/1.JBO.20.4.045002

Li R, Chow T, Matinlinna J. Ceramic dental biomaterials and CAD/CAM technology: state of the art. *J Prosthodontic Res* 2014; 58(4):208–16.

Magne P. Pascal Magne: ‘It should not be about aesthetics but tooth-conserving dentistry.’ Interview by Ruth Doherty. *Br Dent* 2012;213:189-91.

- Mahamood RM, Akinlabi ET, Shukla M, Pityana S. Functionally graded material: an overview. *Proc World Cong Eng.*2012; 3:2078–0958.
- Mahmoud MM, Thumm M. Crystallization of lithium disilicate glass using high frequency microwave processing. *J Euro Ceramic Soc.* 2015;35(10):2915-22.
- Manhart J, Chen HY, Hamm G, Hickel R. Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition. *Oper Dent* 2004;29(5):481-508.
- Marshall GW Jr, 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.
- Marshall SJ, Balooch M, Habelitz S, Balooch G, Gallagher R, Marshall GW. The dentin enamel junction a natural, multilevel interface. *J Euro Ceramic Soc.* 2003;23(15):2897–2904.
- Masuda T, Kakimoto K, Takahashi K, Komasa Y. Fabrication of all-ceramic crowns by a new method. *Dent Mater J.* 2016;35(2):290-7.
- Menezes BRC, Campos TMB, Montanheiro LA, Ribas RG, Coppio LSC. Non-isothermal crystallization kinetic of polyethylene/carbon nanotubes nanocomposites using isoconversional method. *J Compos Sci.* 2019;3(21):1-18.
- Miyazaki T, Nakamura T, Matsumura H, Ban S, Kobayashi T. Current status of zirconia restoration. *J Prosthodontic Res.* 2013; 57(4):236–61.
- Mohebi MM, Evans JRG. A drop-on-demand ink-jet printer for combinatorial libraries and functionally graded ceramics. *J Comb Chem* 2002;4(4):267-74.
- Monmaturapoj N, Lawita P, Thepsuwan W. Characterisation and properties of lithium disilicate glass ceramics in the $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O-K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3$ system for dental applications. *Adv in Mate Sci Eng* 2013: Article ID 763838. doi.org/10.1155/2013/763838
- 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.

Omatete P, Janney M, Strehlow R. Gelcasting – a new ceramic forming process. *Ceram Bull* 1991;70:1641-9.

Prabhakaran K, Sooraj R, Melkeri A. A new direct coagulation casting process for alumina slurries prepared using poly(acrylate) dispersant. *Ceram Int* 2009;35(3):979–85.

Pieger S, Salman A, Bidra A. Clinical outcomes of lithium disilicate single crowns and partial fixed dental prostheses: a systematic review. *JPD* 2014;112(1):22-30.

Quinn JB, Quinn GD. A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. *Dent Mater J.* 2010;26(2):135-47.

Ramos NDC, Campos TMB, La Paz IS, Machado JPB, Bottino MA, Cesar PF, et al. Microstructure characterization and SCG of newly engineered dental ceramics. *Dent Mater J.* 2016;32(7):870-8.

Ramos NDC, Kaizer MR, Campos TMB, Kim J, Zhang Y, Melo RM. Silica-based infiltrations for enhanced zirconia-resin interface toughness. *J Dent Res.* 2019;98(4):423-29.

Roscoe MG, Noritomi PY, Novais VR, Soares CJ. Influence of alveolar bone loss, post type, and ferrule presence on the biomechanical behavior of endodontically treated maxillary canines: strain measurement and stress distribution. *J Prosthet Dent.* 2013;110(12):116–26.

Samodurova A, Kocjan A, Swain MV, Kosmac T. The combined effect of alumina and silica co-doping on the ageing resistance of 3Y-TZP bioceramics. *Acta Biomater* 2015;11(1):477-87.

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.

Schweiger M, Höland W, Frank M, Drescher H, Rheinberger VM. IPS Empress 2, a new pressable high strength glass-ceramic for esthetic all ceramic restoration. *Quint Dent Technol.* 1999;22:143–52.

Schwindling FS, Rues S, Schmitter M. Fracture resistance of glazed, full-contour ZLC incisor crowns. *J Prosthodont Res.* 2017; 61(3):344-9.

Seydler B, Schmitter M. Clinical performance of two different CAD/CAM-fabricated ceramic crowns: 2-Year results. *J ProsthetD* 2015; 114(2): 212-6.

Stookey SD. Catalyzed crystallization of glass in theory and practice. *Ind. Eng. Chem.* 1959;51(7):805-8.

Soboyejo W, Niu X, Du J. Creep-assisted slow crack growth in bio-inspired dental multilayers. *J Mechan beh biom materials* 2015; 46:41-8.

Srion A, Thepsuwan W, Monmaturapoj N. Preparation and fabrication of lithium disilicate glass ceramic as dental crowns via hot pressing method. *Int J chem mol nucl mater met eng* 2014;8(12):1439-42.

Suresh S, Giannakopoulos AE, Alcala J. Spherical indentation of compositionally graded materials: theory and experiments. *Acta Mater.* 1997; 45(4):1307–21.

Sonza QN, Della Bona A, Borba M. Effect of the infrastructure material on the failure behavior of prosthetic crowns. *Dent Mater J.* 2014; 30(5):578-85.

Strobl S, Rasche S, Krautgasser C, Sharova E, Lube T. Fracture toughness testing of small ceramic discs and plates. *J Europ Ceramic Soc.* 2014;34(6):1637-42.

Swain MV, Coldea A, Bilkhair A, Guess PC. Interpenetrating network ceramic-resin composite dental restorative materials. *Dent Mater J.* 2016; 32(1):34–42.

Tashiro T, Wada M. Glass-ceramics crystallized with zirconia. *Advances in Glass Technology.* New York: Plenum Press; 1963. p.18–9.

Teichmann M, Gockler F, Weber V, Yildirim M, Wolfart S, Edelhoff D. Ten-year survival and complication rates of lithium-disilicate (Empress 2) tooth-supported crowns, implant-supported crowns, and fixed dental prostheses. *J Dent.* 2017; 56:65-77.

Tholey MJ, Swain MV, Thiel N. Thermal gradients and residual stresses in veneered Y-TZP frameworks. *Dent Mater J.* 2011;27(11):1102–10.

Tribst JPM, Rodrigues VA, Borges ALS, Lima DR, Nishioka RS. Validation of simplified implant retained cantilever fixed prosthesis. *Implant Dent.* 2018;27:1-8.

Vandeperre LJ, Wild AM, Luyten J. Gelating gelcasting of ceramic components. *J mater proc technol.* 2003;135:312-6.

Versluis A, Tantbirojn D, Pintado MR, DeLong R, Douglas WH. Residual shrinkage stress distributions in molars after composite restoration. *Dental Mater J.* 2004; 20(6):554–64.

Wang F, Gao J, Wang H, Chen J. Flexural strength and translucent characteristics of lithium disilicate glass-ceramics with different P₂O₅ content. *Mater design* 2010;31:3270-4.

Wang F, Chai Z, Deng Z, Gao J, Wang H, Chen J. Effect of heat-pressing temperature and holding time on the microstructure and flexural strength of lithium disilicate glass-ceramics. *Plos* 2015;10(5):1-10.

Yang J, Yu J, Huang Y. Recent developments in gelcasting of ceramics. *J Euro Ceram Soc* 2011;31:2569–91.

Zanotto ED. Preface/committees/acknowledgements. *J Non-Cryst Solids* 1997;219(42):1-233.

Zarone F, Russo S, Sorrentino R. From porcelain-fused-to-metal to zirconia: clinical and experimental considerations. *Dent Mater J.* 2011; 27(1):83–96.

Zhang Y, Kim J-W. Graded structures for damage resistant and aesthetic all-ceramic restorations. *Dent Mater J.* 2009; 25(6):781–90.

Zhang Y, Mai Z, Barani A, Bush M, Lawn B. Fracture-resistant monolithic dental crowns. *Dent Mater J.* 2016; 32(3):442-9.

