

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Isabela Sandim Sousa Leite Weitzel**

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MATERIAIS PARA  
CAD/CAM, CIMENTADOS A UM SUBSTRATO  
ANÁLOGO À DENTINA**

**Taubaté – SP**  
**2018**

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Isabela Sandim Sousa Leite Weitzel**

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MATERIAIS PARA  
CAD/CAM, CIMENTADOS A UM SUBSTRATO  
ANÁLOGO À DENTINA**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Odontologia da  
Universidade de Taubaté para obtenção do  
Título de Mestre em Odontologia.  
Área de Concentração: Prótese Dentária  
Orientador: Profa. Dra. Marina Amaral

**Taubaté – SP**  
**2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo  
SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

W436d Weitzel, Isabela Sandim Sousa Leite  
Desempenho mecânico de materiais para CAD/CAM,  
cimentados a um substrato análogo à dentina / Isabela  
Sandim Sousa Leite Weitzel. - 2018.  
73f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Taubaté,  
Departamento de Odontologia, 2018.  
Orientação: Profa. Dra. Marina Amaral, Departamento de  
Odontologia.

1. Cerâmica. 2. Fadiga. 3. Longevidade. I. Título.

CDD- 617.695

**Comissão Julgadora**

**Data: 05 de abril de 2018**

**Resultado:** Aprovado

**Profa. Dra. Marina Amaral**

**Assinatura:** Marina Amaral

**Profa. Dra. Lais Regiane da Silva Concílio**

**Assinatura:** Lais Regiane da Silva Concílio

**Profa. Dra. Renata Marques de Melo Marinho**

**Assinatura:** Renata Marques de Melo Marinho

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, por me guiar e iluminar em todos os momentos da minha vida e por sempre colocar em meu caminho pessoas amigas e preciosas.

À Professora Marina Amaral, pela extrema dedicação, pela atenção constante e disponibilidade. Agradeço carinhosamente por sua sábia e serena orientação, você exerceu este papel com extrema competência. Obrigada pela confiança que desde o início demonstrou em minha capacidade, por me incentivar e por me receber tão bem em sua casa. Espero sempre encontrar professores comprometidos, entusiasmados e dedicados como você.

Ao programa de pós-graduação de Odontologia da Universidade de Taubaté, representado pela Professora Laís Regiane da Silva Concílio, e a todos os professores do mestrado pelos ensinamentos transmitidos constantemente, pela responsabilidade e compromisso com a formação de mestres capacitados. Tenho certeza de que fiz uma excelente escolha ao optar por este programa, vocês foram referenciais para mim e contribuíram muito para minha formação.

Aos Professores, Rafael Pino Vitti, Laís Regiane da Silva Concílio e Priscila Christiane Suzy Liporoni, por terem participado da banca do meu Exame de

Qualificação e terem contribuído com suas sugestões e dicas para a edição final deste trabalho.

Às Professoras, Laís Regiane da Silva Concílio e Renata Marques de Melo Marinho, por aceitarem o convite para compor a banca examinadora e dedicarem seu tempo para leitura desta dissertação. Muito obrigada!

Aos alunos de iniciação científica, Magna Perim e João Henrique Rodrigues, pela colaboração na execução desta pesquisa.

Ao Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista de São José dos Campos, por ter aberto as portas e cedido os laboratórios para que parte desta pesquisa pudesse ser realizada.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio pesquisa (# 2016/22317-4) concedido para a realização deste trabalho.

Aos meus maravilhosos pais, Henrique e Mônica, presença essencial em toda a minha vida, os mais profundos agradecimentos por suas sábias lições de esperança e positivismo. Obrigada por construírem a nossa valiosa família, por me ensinarem valores que irei levar sempre comigo e por acreditarem tanto em mim. Vocês são os meus maiores mestres e o meu maior orgulho. A vocês, que sempre vibraram com as minhas conquistas, dedico esta vitória!

Ao Pedro, meu amado esposo, por todo o seu amor, carinho, admiração, preocupação e apoio incondicional. Por ser além de um precioso marido, meu maior companheiro e melhor amigo. Obrigada pelas vezes que foi me fazer companhia no mestrado, essas semanas foram com certeza as mais completas. A você, que de forma especial e carinhosa sempre me incentivou e deu força para que eu realizasse o mestrado, dedico esta conquista.

Aos meus queridos irmãos, Flávia e Vinícius, pela cumplicidade, apoio e amizade de sempre. Por estarem sempre prontos a me ajudar em qualquer circunstância e em qualquer hora. Acreditem: vocês dois são indispensáveis e insubstituíveis... são os melhores!

Aos amigos do mestrado, pela companhia e ótima convivência, pelos momentos de aprendizado compartilhados, pelas trocas de experiências e pelos ótimos momentos de descontração.

A todos vocês, os meus sinceros agradecimentos!

Weitzel, ISSL. Desempenho mecânico de materiais para CAD/CAM, cimentados a um substrato análogo à dentina. [Dissertação de mestrado]. Taubaté: Universidade de Taubaté, Departamento de Odontologia, 2018. 72 p.

## RESUMO

**Objetivos:** No presente estudo foi avaliada e comparada a dureza, a tenacidade à fratura, a carga para fratura e a fadiga de materiais restauradores indiretos, indicados para CAD/CAM e cimentados adesivamente a um substrato análogo à dentina (NG10). **Metodologia:** Os materiais utilizados foram: cerâmica de dissilicato de lítio, cerâmica feldspática, cerâmica de matriz resinosa e compósito nanohíbrido. Após tratamento de superfície, as amostras na forma de discos (11 mm x 1,2 mm), foram cimentadas adesivamente as bases de NG10 com cimento resinoso dual. A dureza dos materiais (discos) foi mensurada (n=5) por meio de um microdurômetro e a tenacidade à fratura foi avaliada pelo método “*Surface Crack in Flexure*”. A carga para fratura foi medida em uma máquina de ensaio universal (n=20). As amostras (n=20) foram submetidas à fadiga cíclica sob 400 N, a 5 Hz, até o máximo de  $1 \times 10^6$  ciclos. **Resultados:** A menor dureza e carga para fratura foram obtidas pelo compósito nanohíbrido. O dissilicato de lítio exibiu a maior dureza. Os demais materiais apresentaram valores de carga para fratura semelhantes. Os maiores valores de tenacidade à fratura foram obtidos pelo dissilicato de lítio e compósito nanohíbrido. Apenas uma amostra do dissilicato de lítio e uma do compósito nanohíbrido fraturaram após a fadiga. A cerâmica feldspática não apresentou trincas internas nem fratura catastrófica após  $1 \times 10^6$  ciclos. **Conclusões:** a menor dureza e a menor carga para fratura foram exibidas pelo compósito nanohíbrido, porém este apresentou os maiores valores de tenacidade à fratura juntamente com o dissilicato de lítio. A cerâmica feldspática foi o material que mostrou o melhor desempenho no teste de fadiga mecânica.

**Palavras-chave:** Cerâmica; Fadiga; Longevidade.



Weitzel, ISSL. Mechanical performance of CAD/CAM materials bonded to a dentin-like substrate. [Master dissertation]. Taubaté: University of Taubaté, Department of Dentistry, 2018. 72 p.

## ABSTRACT

**Aim:** To evaluate and compare the hardness, the fracture toughness, the load to fracture and fatigue of indirect restorative materials indicated for CAD/CAM and adhesively bonded to a substrate similar to dentin (NG10). **Methods:** Materials tested were: lithium disilicate ceramic, feldspathic ceramic, resin matrix ceramic and nanohybrid composite. After surface treatment, disc-shaped samples (11 mm x 1,2 mm) were cemented to NG10 bases with dual cured resin cement. The hardness of materials was measured (n=5) with a microhardness tester, and the fracture toughness was evaluated by the surface crack in flexure method. Load to fracture was measured in a universal testing machine (n=20). And other 20 samples per group were subjected to cyclic fatigue under 400 N, 5 Hz, until  $1 \times 10^6$  cycles. **Results:** The lowest values of hardness and load to fracture were obtained by the nanohybrid composite; lithium disilicate presented the highest values of hardness, and the load to fracture was similar to the other materials. Lithium disilicate and nanohybrid composite presented the highest values of fracture toughness. Same groups presented one catastrophic failure each during fatigue test. Feldspathic ceramic did not presented fracture of internal cracks after  $1 \times 10^6$  mechanical cycles. **Conclusions:** Nanohybrid composite presented the lowest hardness and load to fracture, but the highest values of fracture toughness together with lithium disilicate. Feldspathic ceramic presented the best performance under mechanical fatigue.

**Keywords:** Ceramics; Fatigue; Longevity.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	10
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b>	16
<b>3 PROPOSIÇÃO</b>	36
<b>4 METODOLOGIA</b>	37
<b>4.1 Confeção das Amostras</b>	40
4.1.1 Obtenção dos discos dos materiais restauradores	40
4.1.2 Obtenção das bases de resina epóxi	41
4.1.3 Cimentação das amostras	41
4.1.3.1 Preparo das bases de NG10	41
4.1.3.2 Preparo dos discos dos materiais restauradores	42
<b>4.2 Ensaio Mecânicos</b>	43
4.2.1 Dureza	43
4.2.2 Tenacidade à fratura	44
4.2.3 Carga para fratura	45
4.2.4 Fadiga mecânica	47
<b>5 RESULTADOS</b>	49
5.1 Dureza	49
5.2 Tenacidade à fratura	49
5.3 Carga para fratura	50
5.4 Fadiga mecânica	55

<b>6 DISCUSSÃO</b>	60
<b>7 CONCLUSÃO</b>	69
<b>REFERÊNCIAS</b>	70

## 1 INTRODUÇÃO

Inúmeras restaurações dentárias são executadas diariamente em consultórios odontológicos, com o intuito de reparar tecidos dentais danificados ou elementos perdidos. A demanda por tratamentos restauradores estéticos tem resultado em um aumento na pesquisa e aperfeiçoamento de novos materiais odontológicos, sempre com o intuito de se ter um material no qual seja possível a mimetização da estrutura dental (Barão et al., 2010; Kelly & Benetti, 2011)

Segundo Coldea et al. (2013) o objetivo ideal para a Odontologia Restauradora seria substituir a estrutura do dente perdida por um material restaurador com estrutura e propriedades físicas semelhantes ao dente natural. Uma grande variedade de materiais restauradores para sistemas CAD/CAM está disponível no mercado, que consiste principalmente de diferentes blocos de cerâmicas e compósitos. Os blocos confeccionados para CAD/CAM apresentam maior resistência mecânica, devido ao baixo percentual de falhas intrínsecas.

As cerâmicas odontológicas têm sido usadas para a confecção de uma grande variedade de restaurações indiretas, como inlays, onlays, implantes, coroas e próteses parciais fixas de dois ou mais elementos. Este fato se deve principalmente a propriedades como biocompatibilidade, resistência ao desgaste e estética (Kelly, 1997; Wang et al., 2007). No entanto, sabe-se que a principal falha clínica das restaurações cerâmicas continua sendo a fratura catastrófica, ou seja, uma fratura não passível de reparo (Haselton et al., 2000; Taskonak et al., 2006; Scherrer et al., 2007).

Um sistema de classificação para os materiais cerâmicos foi proposto por Gracis et al. (2015), no qual os critérios utilizados foram baseados nas fases presentes na composição química de cada material. Foram divididos em três categorias: cerâmicas com matriz vítrea - materiais com uma fase vítrea; cerâmicas policristalinas - materiais sem fase vítrea; cerâmicas com matriz resinosa - matrizes poliméricas contendo predominantemente compostos refratários inorgânicos.

De acordo com Awada & Nathanson (2015) os materiais cerâmicos exibem elevada resistência à flexão e alto módulo de elasticidade, esta combinação resulta em uma diminuição da capacidade de sofrer deformação, portanto estes materiais são mais resistentes, frágeis e menos flexíveis. A resistência à flexão de três pontos das cerâmicas varia para as feldspáticas de 105 a 137,8 MPa (Albero et al., 2015; Awada & Nathanson, 2015) e para o dissilicato de lítio de 271,6 a 376,9 MPa (Albero et al., 2015; Lawson et al., 2016). As variações dos valores entre os estudos se deve, em parte, ao tamanho das amostras, às configurações de cada teste e os equipamentos utilizados para medição.

As cerâmicas apresentam como vantagens uma elevada resistência à fratura e uma grande estabilidade de cor, no entanto, exibem um desgaste elevado dos dentes antagonistas e uma maior perda da estrutura dentária devido a sua espessura oclusal mínima de 1,5 a 2,0 mm (Dirxen et al., 2013). Estes dois últimos parâmetros são melhores para as resinas compostas, contudo, o desgaste do próprio material é maior. Estes dados mostram que existe a necessidade de um material que combine as vantagens da cerâmica com as dos compósitos (Dirxen et al., 2013).

Coldea et al. (2013) relataram que os fabricantes têm desenvolvido novas formulações para materiais CAD/CAM que combinam as propriedades vantajosas

das cerâmicas, tais como durabilidade e estabilidade de cor, com as das resinas compostas, como melhores propriedades de flexão e baixa abrasividade. Este novo material, que tenta imitar as propriedades dos dentes naturais em sua estrutura e suas propriedades físicas, se constitui de uma cerâmica de matriz resinosa.

Os objetivos dos fabricantes ao desenvolver os materiais cerâmicos com matriz resinosa foram: (1) obter um material com o módulo elástico mais próximo ao da dentina quando comparado com cerâmicas tradicionais; (2) desenvolver um material mais fácil de fabricar e ajustar do que as cerâmicas de matriz vítrea (por exemplo: dissilicato de lítio) ou cerâmica policristalina e (3) facilitar o reparo ou modificação intraoral com resina composta (Gracis et al., 2015).

Segundo Dirxen et al. (2013) e Coldea et al. (2013) esses materiais devem possuir, a partir de uma perspectiva biomimética, propriedades mecânicas que se aproximem das do esmalte e dentina. Portanto, o módulo elástico deve aproximar-se ao da dentina e a dureza deve estar entre a do esmalte e da dentina. Della Bona et al. (2014) ressaltam que associar o módulo elástico de compósitos à base de resina, que é semelhante ao da dentina, com a estética de longa duração das cerâmicas seria ideal para um material restaurador.

O intuito de criar um conjunto dente-restauração que possua comportamento mecânico homogêneo é uma excelente teoria, e depende de uma ótima adesão entre os materiais para que as tensões sejam distribuídas homoganeamente pelo conjunto (Braga et al., 2010; Opdam et al., 2016). A distribuição de tensões entre o material restaurador e o substrato dental representa um fator determinante na longevidade das restaurações, assim como a união forte e estável e a similaridade nos módulos elásticos dos diferentes materiais envolvidos (Tay & Pashley, 2007).

O módulo elástico altera entre os materiais restauradores e os tecidos envolvidos. Os valores para o dissilicato de lítio variam de 63.9 a 95.9 GPa (Ramos et al., 2016; Homaei et al., 2016); para a cerâmica feldspática de 26.0 a 48.7 GPa (Awada & Nathanson, 2015; Ramos et al., 2016); o Vita Enamic (cerâmica de matriz resinosa) exibe valores entre 21.5 e 37.95 GPa (Lawson et al., 2016; Della Bona et al., 2014); os compósitos entre 12.6 e 14.1 GPa (Awada & Nathanson, 2015; Lawson et al., 2016); já a dentina apresenta o módulo elástico variando entre 16.0 a 25.0 GPa (Hairul Nizam et al., 2005; Mahoney et al., 2000).

Devido ao módulo de elasticidade da cerâmica de matriz resinosa assemelhar-se ao da dentina, prevê-se uma distribuição de tensão mais uniforme no sistema dentina/cimento/material restaurador, especialmente durante a mastigação (Coldea et al., 2013).

Para Coldea et al. (2013) a relevância das restaurações de cerâmica de matriz resinosa geradas por CAD/CAM seria a sua usinabilidade, que devido à porosidade da cerâmica sinterizada e à fração de polímero interpenetrante, prevê uma boa maquinabilidade com um mínimo de lascamento. Sendo assim, a tolerância a danos das cerâmicas de matriz resinosa é maior em comparação com as cerâmicas usinadas, que muitas vezes lascam durante a fabricação.

Um dos materiais de cerâmica de matriz resinosa é o Vita Enamic (Vita Zahnfabrik) que consiste em 86% em peso (75% em volume) de fase inorgânica e 14% em peso (25% em volume) de fase orgânica. A fase inorgânica é uma cerâmica feldspática, enquanto que a fase orgânica é composta por dimetacrilatos (UDMA e TEGDMA) (Della Bona et al., 2014; El Zhawi et al., 2016).

A dureza Vickers do material híbrido Enamic foi avaliada com valores entre os valores da dentina e esmalte. O desgaste do próprio material é comparável ao da

cerâmica comum, enquanto que o desgaste do dente antagonista é menor. Além disso, para a preservação da estrutura dentária o material pode ser usinado em uma espessura muito fina (0,2 – 0,5 mm), permanecendo ainda suficientemente forte para evitar trincas que são paralisadas pelo polímero interpenetrante dentro da rede cerâmica (Dirxen et al., 2013).

Segundo Awada & Nathanson (2015) os materiais à base de polímero apresentam um melhor desempenho em testes de flexão do que os materiais cerâmicos. Isto se deve a uma resistência à flexão relativamente elevada combinada com um módulo elástico relativamente baixo, o que resulta em um aumento na capacidade de suportar cargas, sendo assim estes materiais tendem a ser menos frágeis e mais flexíveis. Para Ramos et al. (2016) com o desenvolvimento desses novos materiais indiretos há a necessidade de novos estudos para caracterizar suas propriedades mecânicas e de fadiga, na tentativa de prever seu comportamento clínico.

Embora o teste de resistência à flexão seja considerado o padrão, sua relevância clínica tem sido criticada, já que a maioria das falhas mecânicas de restaurações dentárias não se manifesta como fraturas de impacto, mas como fraturas por fadiga após carga oclusal repetida durante a função (Homaei et al., 2016). Awada & Nathanson (2015) acrescentam que um material que tem um bom desempenho nos testes de flexão pode ter limitações em outros aspectos, tais como no ensaio de fadiga. Portanto, testes de fadiga bem delineados, acompanhados por análise de fratura podem trazer bons indicativos da sobrevida do conjunto dente-restauração em situações clínicas (Bonfante & Coelho, 2016).

Ankyu et al. (2016) relatam a importância de avaliar a influência do ciclo térmico e mecânico nos materiais dentários em testes laboratoriais, na tentativa de



prever o comportamento de fadiga *in vivo*. Ressaltam ainda que se o material for utilizado para aplicações de coroa, a avaliação da resistência à fadiga do conjunto coroa/substrato também será necessária para obter informações clinicamente relevantes.

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a dureza, a tenacidade à fratura, a carga para fratura e a fadiga mecânica de quatro materiais restauradores indiretos (cerâmica de dissilicato de lítio, cerâmica feldspática, cerâmica de matriz resinosa e compósito nanohíbrido), indicados para CAD/CAM e cimentados adesivamente a um substrato semelhante à dentina. Estes materiais foram selecionados por serem indicados para restaurações parciais e por permitirem uma comparação das cerâmicas de matriz resinosa com os demais materiais, já que de acordo com Della Bona et al. (2014), esta cerâmica apresentou propriedades mecânicas que variaram entre as cerâmicas vítreas e os compósitos.

A hipótese testada é de que as restaurações a base de cerâmica com matriz resinosa apresentam a maior carga para fratura, maior tenacidade à fratura e maior resistência à fadiga quando unidas adesivamente ao substrato análogo à dentina.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Coldea et al. (2013) compararam a resistência à flexão, módulo elástico, deformação à fratura e dureza do polímero isolado do PICN (rede cerâmica infiltrada por polímeros – cerâmica de matriz resinosa), da rede de cerâmica feldspática densamente sinterizada (100%), de quatro redes cerâmicas de feldspato com densidades variáveis (59%, 63%, 68% e 72%) e quatro PICNs com base nas cerâmicas de diferentes densidades. A resistência à flexão e o módulo de elasticidade foram mensurados utilizando-se o teste de flexão de três pontos. A dureza foi medida por meio de cinco indentações Vickers por material, com cargas de 50 N e, as áreas indentadas foram examinadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e óptica. Os resultados mostraram que com o aumento da densidade das cerâmicas, a resistência à flexão aumentou de 9,2 (cerâmica porosa – 63% de densidade) para 103,3 MPa (cerâmica densa – 100% de densidade). Já os valores para os PICNs foram inversamente proporcionais à densidade das cerâmicas, sendo o mais elevado 159,9 MPa (PICN – 59%) e o menor 131,0 MPa (PICN – 72%). Em relação ao módulo de elasticidade, os valores aumentaram, de acordo com a densidade crescente das cerâmicas, tanto para as cerâmicas porosas quanto para os PICNs. O PICN 59% apresentou módulo elástico de 16,4 GPa, o PICN 72% de 28,1 GPa e a cerâmica densa de 54,5 GPa. Quanto maior a densidade da cerâmica, menor foi a deformação no momento da fratura, tanto para as cerâmicas porosas quanto para os PICNs. A dureza dos materiais aumentou exponencialmente ao elevar a proporção de cerâmica densa, sendo 1,0 GPa para o PICN 59%, 2,1 GPa para PICN 72% e 6,4 GPa para a cerâmica densa. As imagens

observadas no MEV, das fissuras induzidas na indentação, indicam que a rede de polímeros provoca uma maior deflexão da fissura do que o material cerâmico denso. Os autores concluíram que as propriedades mecânicas da cerâmica feldspática podem ser melhoradas pela infiltração de uma segunda fase (polímero) em um precursor cerâmico poroso.

Dirxen et al. (2013) avaliaram o desempenho clínico de uma cerâmica de matriz resinosa (Vita Enamic) para uma abordagem de tratamento não invasivo de erosões dentárias graves. Todos os dentes posteriores, superiores e inferiores, foram restaurados com coroas totais com espessura que variava de 0,5 a 1,5 mm. Para avaliar o desempenho clínico e a durabilidade das coroas, o paciente foi examinado 6 meses e um ano depois. As coroas estavam intactas, os tecidos moles saudáveis e não foram observadas descolorações. No entanto, uma vez que estes materiais são novos no mercado, estudos in vivo a longo prazo ainda estão em andamento.

Belli et al. (2014) compararam a resistência à fadiga de materiais cerâmicos e resinas compostas. As cerâmicas selecionadas foram: óxido de zircônio (e.max ZirCAD, Ivoclar), dissilicato de lítio usinado (e.max CAD, Ivoclar), dissilicato de lítio prensado (e-max Press, Ivoclar), cerâmica vítrea de fluorapatita (e.max Ceram, Ivoclar) e cerâmica feldspática usinada (Vitablocs Trilux Forte, Vita). As resinas testadas consistiram em quatro diretas com conteúdo de carga variável (Clearfil Majesty Posterior, Kuraray; GrandioSO, Voco; Tetric EvoCeram, Ivoclar e CeramX Duo, Dentsply) e uma indireta usinada (Lava Ultimate, 3M ESPE). As amostras foram confeccionadas em forma de barra. Para mensurar a resistência inicial à flexão ( $\sigma_{in}$ ), as amostras (n=15) foram carregadas em flexão de 4 pontos a 0,75 mm/min, em uma máquina de ensaio universal. A resistência à fadiga de flexão ( $\sigma_{ff}$ )

foi determinada para  $10^4$  ciclos em condições de teste equivalentes, a uma frequência de 0,5 Hz ( $n=25$ ). O método de abordagem “staircase” foi utilizado para avaliar a resistência à fadiga. Em relação à análise de Weibull, a cerâmica de óxido de zircônio exibiu a maior resistência característica ( $\sigma_0 = 816,97$  MPa), seguida pelas duas cerâmicas de dissilicato de lítio, com valores significativamente mais baixos (versão usinada = 279,68 MPa e prensada = 325,13 MPa), estas apresentaram os menores valores de  $m$  (módulo de Weibull) entre os materiais cerâmicos. A cerâmica feldspática revelou a menor resistência característica (67,82 MPa) e o maior valor de  $m$  (22,5) entre as cerâmicas. Os valores de  $\sigma_0$  para as resinas compostas variaram de 92 a 145 MPa, sendo que os materiais com maior conteúdo de carga exibiram as maiores resistências, já os valores de  $m$  mais altos foram encontrados para Tetric EvoCeram (23,58) e Lava Ultimate (17,57). Os maiores valores de  $\sigma_{in}$  e  $\sigma_{ff}$ , foram apresentados pela cerâmica de óxido de zircônio (768,13 e 440,01 MPa, respectivamente). Embora as cerâmicas de dissilicato de lítio tenham mostrado valores semelhantes no teste estático ( $\sigma_{in}$ ), a versão prensada revelou um desempenho superior após o carregamento cíclico (202,78 MPa) sobre a versão usinada (120,87 MPa). Dentre os materiais cerâmicos, a feldspática e a de fluorapatita exibiram os menores valores de  $\sigma_{in}$  e  $\sigma_{ff}$ , e se revelaram equivalentes. Em relação às resinas compostas, a com maior conteúdo de carga (82% do volume) Clearfil Majesty Posterior mostrou um melhor desempenho sob fadiga. A resina indireta, Lava Ultimate, e GrandioSO foram semelhantes quanto à  $\sigma_{ff}$  (63,66 e 60,50 MPa, respectivamente). A maior degradação da resistência ( $\sigma_{in} - \sigma_{ff}$ , em %) foi registrada para a resina CeramX Duo (62,3%), enquanto que o dissilicato de lítio prensado mostrou a menor susceptibilidade à fadiga (29,6% de degradação da resistência). Os autores concluíram que a degradação da resistência, seguindo o

comportamento usual dos materiais cerâmicos e resinosos, mostrou alta dependência da composição e microestrutura, indicando mecanismos de degradação distintos. Assim, as cerâmicas de óxido de zircônio e dissilicato de lítio apresentaram as maiores resistências à fadiga inicial e residual, podendo produzir melhor desempenho clínico do que as resinas compostas e as cerâmicas ricas em vidro.

Della Bona et al. (2014) caracterizaram a microestrutura e determinaram algumas propriedades mecânicas (tenacidade à fratura -  $K_{Ic}$ , densidade -  $\rho$ , razão de Poisson -  $\nu$  e módulo de Young -  $E$ ) de um material cerâmico de matriz resinosa (Vita Enamic). As amostras ( $n=5$ ) foram examinadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) para análises qualitativas e quantitativas. A composição do material foi registrada usando espectroscopia por energia dispersiva (EDS). A tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) foi avaliada pelo método de entalhe (“*single edge V-notch beam*” – SEVNB), as amostras foram posicionadas em um dispositivo de flexão de três pontos com a superfície entalhada em V voltada para baixo, a carga foi aplicada até a fratura.  $\rho$  foi calculada usando o princípio de Arquimedes.  $\nu$  e  $E$  foram mensurados utilizando um medidor de espessura ultrassônico com uma combinação de um gerador de pulso e um osciloscópio. As imagens mostraram uma rede cerâmica dominante ( $71 \pm 3$  vol.%) tendo a leucita, como a fase principal, e a zircônia, como uma fase menor, interconectadas em uma rede polimérica. Os valores médios e desvio padrão foram:  $K_{Ic} = 1,09 \pm 0,05$  MPa  $m^{1/2}$ ;  $\rho = 2,09 \pm 0,01$  g/cm<sup>3</sup>;  $\nu = 0,23 \pm 0,002$  e  $E = 37,95 \pm 0,34$  GPa. Os autores concluíram que o material Vita Enamic mostrou propriedades mecânicas que variaram entre as porcelanas e os compósitos à base de resina, o que reflete em seus componentes microestruturais.

Quinn et al. (2014) utilizaram o teste de lascamento de borda para mensurar a resistência à fratura de 6 materiais restauradores: cerâmica feldspática (Vita); dissilicato de lítio (IPS e.max CAD); cerâmica vítrea a base de leucita (IPS Empress CAD); zircônia 3Y-TZP (Lava); resina nanocerâmica (Lava Ultimate); resina composta (Paradigm MZ100). Foram utilizados dois tipos de indentadores, o de Vickers e um cônico afiado 120°. Os dados de lascamento foram coletados para distâncias de 0,10 até 0,60 mm da borda. O lascamento com o indentador Vickers exigiu 28-45% mais força do que com o cônico afiado 120°, no entanto, a classificação dos materiais, em relação à resistência ao lascamento, foi a mesma para ambos os indentadores. A zircônia 3Y-TZP apresentou a maior resistência ao lascamento de borda, seguida pela resina nanocerâmica, dissilicato de lítio e resina composta que mostraram resistências muito semelhantes. A cerâmica feldspática e a cerâmica vítrea a base de leucita exibiram os menores valores, com comportamento quase idêntico, como mostra a figura 1.

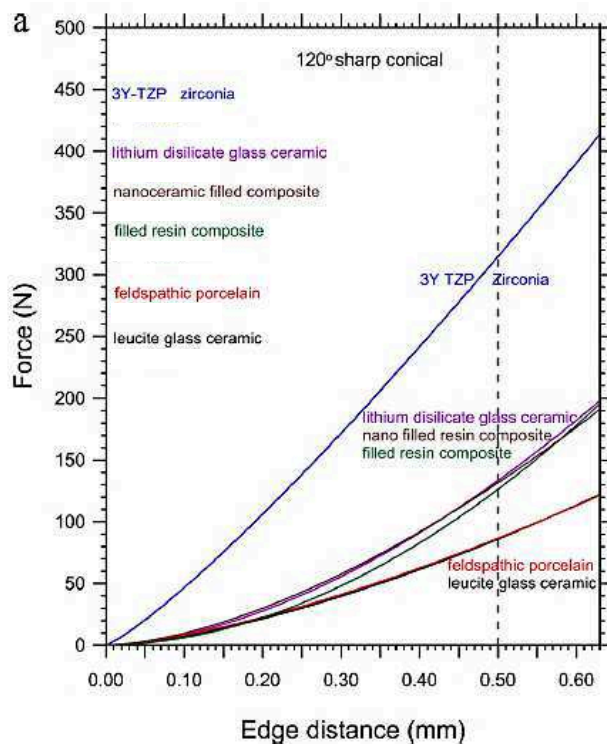
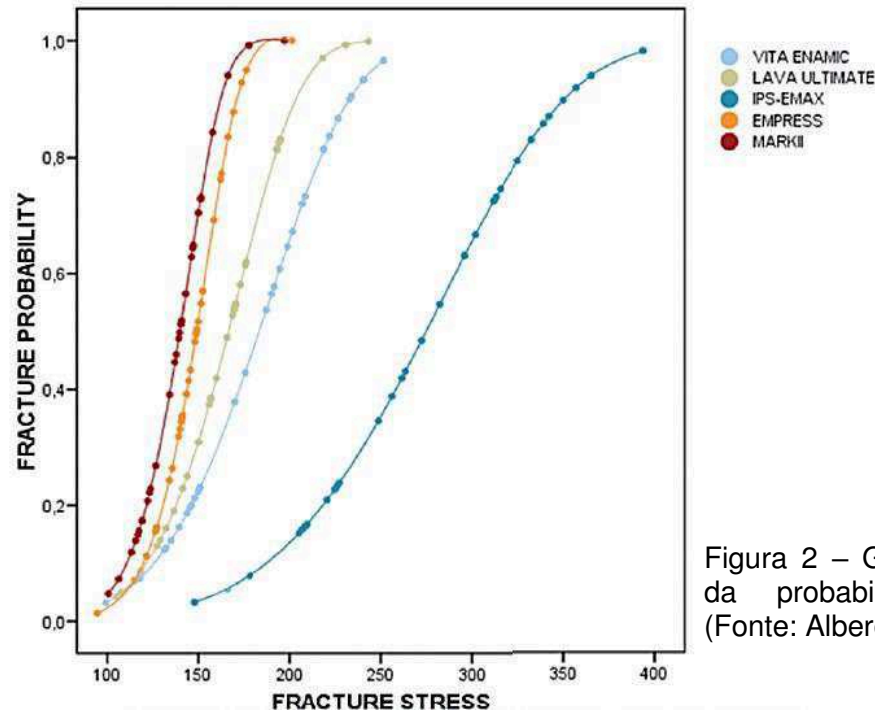


Figura 1 – Gráfico da força necessária para o lascamento vs. distância da borda. É possível verificar a diferença nos resultados de cada grupo, sendo que a zircônia apresenta os melhores resultados (Fonte: Quinn et al., 2014)

Albero et al. (2015) determinaram e compararam as propriedades mecânicas (resistência à flexão, carga para fratura, dureza Vickers e módulo de Weibull) de 5 materiais cerâmicos disponíveis para sistema CAD/CAM. Foram testados os seguintes materiais: cerâmica de matriz resinosa (Vita Enamic), resina nanocerâmica (Lava Ultimate), cerâmica feldspática (Mark II, Vita), dissilicato de lítio (IPS e-max CAD) e uma cerâmica a base de leucita (Empress CAD). O ensaio de flexão em três pontos foi realizado em 30 amostras de cada grupo. A probabilidade de fratura foi estudada por meio do módulo de Weibull e resistência característica dos diferentes materiais. Para cada material, vinte indentações Vickers foram realizadas com carga de 50 N. Os resultados estão ilustrados na tabela 1 e na figura 2 abaixo.

Tabela 1 - Carga para fratura, resistência à flexão e dureza (Fonte: Albero et al., 2015)

	<b>IPS e-max</b>	<b>Vita Enamic</b>	<b>Lava Ultimate</b>	<b>Empress</b>	<b>Mark II</b>
<b>Carga para fratura (KN)</b>	0,44 ± 0,10 <sup>a</sup>	0,25 ± 0,06 <sup>b</sup>	0,26 ± 0,06 <sup>b</sup>	0,23 ± 0,05 <sup>b</sup>	0,22 ± 0,04 <sup>b</sup>
<b>Resistência à flexão (MPa)</b>	271,6 ± 64,7 <sup>a</sup>	180,9 ± 42,2 <sup>b</sup>	164,3 ± 33,3 <sup>b,c</sup>	146,9 ± 20,2 <sup>c,d</sup>	137,8 ± 20,9 <sup>d</sup>
<b>Dureza (GPa)</b>	5,83 ± 0,07 <sup>a</sup>	1,70 ± 0,12 <sup>b</sup>	1,15 ± 0,13 <sup>c</sup>	4,60 ± 0,12 <sup>d</sup>	3,36 ± 0,15 <sup>e</sup>



De acordo com o gráfico, a curva do IPS e-max é muito diferente, sendo necessária uma maior tensão para atingir a mesma probabilidade de fratura dos demais materiais. Comparando os outros quatro materiais, Vita Enamic e Lava Ultimate, apresentaram resultados mais positivos em termos de resistência. Já Empress e Mark II exibiram menor resistência característica, módulo de Weibull muito elevado e alta probabilidade de falha sob baixa tensão. Os autores concluíram que Vita Enamic e Lava Ultimate destacaram-se como os materiais mais resistentes, após IPS e-max, e que, a resistência à flexão, o módulo de elasticidade semelhante ao dente e a menor dureza dos materiais à base de polímeros os tornam uma opção a considerar como material restaurador.

Awada & Nathanson (2015) compararam a resistência à flexão, módulo flexural, módulo de resiliência e integridade marginal de 6 diferentes tipos de materiais fabricados no sistema CAD/CAM (n=25), sendo eles: Vitablocs Mark II (VM2; Vita Zahnfabrik), IPS Empress CAD (EMP; Ivoclar Vivadent), Enamic (ENA;



Vita Zahnfabrik), Paradigm MZ100 Block (MZ1; 3M ESPE), Lava Ultimate (LVU; 3M ESPE), Cerasmart (CES; GC Dental Products). Para avaliar as propriedades mecânicas, as amostras, em forma de barra, foram submetidas ao ensaio de flexão de 3 pontos. Posteriormente, a fim de verificar a rugosidade da borda marginal, 42 coroas monolíticas foram fresadas (n=7) e posicionadas sobre o dente preparado em um manequim. A análise visual qualitativa foi realizada por meio de fotografias e microscopia óptica. Os resultados revelaram que os grupos CES e LVU apresentaram os maiores valores de resistência à flexão (219 e 178 MPa) e módulo de resiliência (3,07 e 1,47 MPa), respectivamente. Estes grupos também mostraram os menores valores para o módulo flexural (7,9 e 10,8 GPa, respectivamente). Em relação à rugosidade da margem, os materiais à base de polímeros (CES, LVU, ENA e MZ1) exibiram as margens mais lisas quando comparados com os cerâmicos (VM2 e EMP). Os autores concluíram que os materiais à base de polímero tiveram melhor desempenho no teste de flexão do que os materiais cerâmicos, esta diferença nas propriedades elásticas pode ser atribuída ao componente resinoso, que ajuda a reduzir a fragilidade e os tornam mais flexíveis.

Gracis et al. (2015) propuseram uma nova classificação para os materiais restauradores cerâmicos, baseada nas formulações e nas características específicas de cada material. Foram então divididos em 3 grupos: cerâmicas com matriz vítrea - materiais cerâmicos inorgânicos não metálicos que contêm uma fase vítrea (cerâmicas feldspática, sintética e infiltrada com vidro); cerâmicas policristalinas - materiais cerâmicos inorgânicos não metálicos que não contêm nenhuma fase vítrea (alumina, zircônia estabilizada, alumina reforçada com zircônia e zircônia reforçada com alumina); cerâmicas com matriz resinosa - matrizes poliméricas contendo predominantemente compostos refratários inorgânicos que podem incluir vidros,

cerâmicas e cerâmicas vítreas (subdividida de acordo com a composição – resina nanocerâmica, cerâmica vítrea em uma matriz interpenetrante de resina, cerâmica de zircônia e sílica em uma matriz interpenetrante de resina). As cerâmicas de matriz resinosa compreendem materiais com uma matriz orgânica altamente preenchida com partículas cerâmicas. Os objetivos para o desenvolvimento desses materiais foram: (1) obter um material com o módulo elástico mais próximo ao da dentina quando comparado com cerâmicas tradicionais; (2) desenvolver um material mais fácil de fabricar e ajustar que as cerâmicas de matriz vítrea (por exemplo: dissilicato de lítio) ou cerâmicas policristalinas e (3) facilitar a reparação ou modificação com resina composta. Sendo assim, como os critérios utilizados para diferenciar os materiais cerâmicos baseiam-se na fase ou fases presentes em sua composição química, todos os materiais cerâmicos podem ser incluídos em um dos três grupos, inclusive os materiais recentemente introduzidos no mercado (figura 3).

Cerâmicas com matriz vítrea	Feldspáticas	
	Sintéticas	A base de leucita
		Dissilicato de lítio e derivados
		A base de fluorapatita
	Infiltradas com vidro	Alumina
		Alumina e magnésio
Alumina e zircônia		
Cerâmicas policristalinas	Alumina	
	Zircônia estabilizada	
	Alumina fortalecida com zircônia	
	Zircônia fortalecida com alumina	
Cerâmicas com matriz resinosa	Resina nanocerâmica	
	Cerâmica vítrea em uma matriz interpenetrante de resina	
	Cerâmica de zircônia e sílica em uma matriz interpenetrante de resina	

Figura 3 – Classificação dos materiais cerâmicos de acordo com Gracis et al. 2015

Aboushelib & Elsafi (2016) avaliaram a resistência à fadiga de duas cerâmicas infiltradas com polímero (Vita Enamic e Lava Ultimate), duas cerâmicas com matriz vítrea (IPS Empress CAD e IPS E.max CAD) e uma cerâmica policristalina (Zir CAD). Os blocos de IPS E.max CAD e Zir CAD foram fresados com espessura de 0,5 - 0,7mm em forma de coping e receberam cerâmica de recobrimento (IPS E.max press). Todas as coroas foram cimentadas em suas matrizes de resina correspondentes utilizando um cimento resinoso. Primeiramente, foi realizado o teste de resistência inicial à fratura utilizando 20 coroas de cada material, estas foram submetidas a uma carga, com velocidade de 0.1 mm/min, até a fratura por meio de uma ponta esférica de aço. As amostras (n=20) foram submetidas à fadiga mecânica: 3,7 milhões de ciclos (representando 7 anos de tempo clínico) com intervalo de 3s. Durante o ensaio as amostras foram imersas em água e submetidas a ciclos térmicos (50000 ciclos, 5-55°C, tempo de permanência 3 min) e mudanças no pH (5000 ciclos em 0,1 mol de hidróxido de sódio seguido por 0,1 mol de ácido láctico, alternadamente). Cada amostra foi submetida a uma carga subcrítica representada por 63% do valor da resistência a fratura inicial. As amostras que sobreviveram ao carregamento cíclico foram carregadas até à falha para calcular a resistência à fratura residual após a fadiga. Foi utilizada microscopia eletrônica de varredura para análise das superfícies fraturadas. Os resultados mostraram uma redução significativa da resistência à fratura inicial para a resistência residual, sendo que a Zircônia apresentou o maior percentual de deterioração (34% de redução na resistência), seguida pelo IPS Empress (32,2%), IPS E.max (27,1%), enquanto Lava Ultimate (15,99%) e Enamic (15,75%) apresentaram os menores percentuais. A incidência de fraturas sob a influência da fadiga foi maior para as duas cerâmicas infiltradas com polímero e IPS Empress (7 - 8 coroas fraturas por grupo). O grupo da

Zircônia não apresentou nenhuma fratura, no entanto, 6 coroas tiveram a cerâmica de recobrimento lascada. O menor percentual de falha foi observado para as coroas de IPS E.max que revelou 3 lascamentos e 2 fraturas. O número de ciclos necessário para causar a fratura do IPS Empress e IPS E.max foi significativamente maior quando comparado com o Enamic e Lava Ultimate. As imagens revelaram que o IPS E.max apresentou os cristais de dissilicato de lítio fortemente preenchidos com uma estrutura de entrelaçamento que proporcionou uma interrupção perceptível contra a propagação da trinca. Já, a matriz polimérica das cerâmicas infiltradas com polímero e a matriz vítrea reforçada com cristais de leucita do IPS Empress não ofereceram muita resistência contra a propagação de trincas. Os autores concluíram que a fadiga dinâmica resultou no enfraquecimento dos materiais testados, no entanto, sua estrutura interna explica os mecanismos de falha.

Ankyu et al. (2016) compararam a resina nanocerâmica (Lava Ultimate - LU) com o dissilicato de lítio (IPS e.max press - EMP) quanto aos seus comportamentos sob fadiga. Foram confeccionadas 160 amostras em forma de barra e cada grupo foi subdividido em quatro grupos (n=20): sem tratamento (NT), ciclo térmico (TC - banhos de água alternados de 5°C e 55°C por 30 s,  $5 \times 10^4$  ciclos), ciclo mecânico (MC - flexão de três pontos, 15 Hz, 10 N e 40 N,  $1,2 \times 10^6$  ciclos) e TC seguido por MC (TCMC). As superfícies fraturadas foram analisadas no MEV. Foram confeccionadas 24 coroas de LU por CAD/CAM e 24 coroas monolíticas de EMP. Todas as coroas foram cimentadas nas matrizes com cimento resinoso. Cada grupo foi subdividido em quatro grupos experimentais (n=6): NT; TC; MC; E TCMC. O ciclo térmico foi realizado nas mesmas condições descritas acima e para o ciclo mecânico foi utilizado uma esfera de aço inoxidável de 10 mm de diâmetro, com carga entre 50 e 300 N, 15 Hz, por  $1,2 \times 10^6$  ciclos. Os valores médios de resistência à flexão de LU

e EMP sem os tratamentos de fadiga (NT) foram 147 MPa e 269 MPa, respectivamente. Quando o grupo LU foi submetido ao tratamento de fadiga TCMC, apresentou resistência flexural significativamente menor do que NT (134 MPa). Já o grupo EMP mostrou significativa redução na resistência à flexão quando tratados com TC (230 MPa). Nenhuma das coroas fraturou durante os tratamentos de fadiga. Sendo assim, para avaliar a resistência à fratura, todas as coroas de LU e EMP foram submetidas a testes de carga para falha, analisando as cargas no início e término da fratura. Os tratamentos de fadiga aumentaram a incidência de trincas. No entanto, no caso de coroas de LU, a geração de trincas ocorreu em cargas relativamente próximas à carga da fratura, assim, não foram registradas diferenças significativas. Por outro lado, a geração de trincas em coroas de EMP ocorreu em cargas relativamente menores em relação à carga da fratura, resultando em diminuição da resistência à fratura, especialmente nas coroas tratadas com TC. Isto sugere que as coroas de EMP são mais susceptíveis à fadiga, como indicado no teste de resistência à flexão. As coroas de LU possuíram resistência à fratura comparável ou até melhor do que a coroa de EMP após os tratamentos de fadiga.

Argyrou et al. (2016) avaliaram a resistência ao lascamento de borda (*edge chipping resistance*) e à flexão de 2 materiais híbridos cerâmica/compósitos (PICN – rede cerâmica infiltrada por polímeros - Vita Enamic; RNC – resina nanocerâmica - Lava Ultimate) e comparam com 2 materiais (CAD/CAM) frequentemente utilizados (FC – cerâmica feldspática - TriLuxe forte; LRGC – cerâmica vítrea reforçada com leucita - IPS Empress CAD). Para o teste de lascamento, as amostras (n=20 por material) foram cimentadas em um substrato de resina composta e o “lascamento”, produzido por um indentador com ponta diamantada cônica afiada. Realizaram-se duas indentações para cada amostra e a carga máxima que causou o lascamento foi

registrada. A resistência à flexão, o módulo elástico e o trabalho de fratura (área sob tensão vs. curva de deflexão) foram mensurados através do teste de 3 pontos (n=22 por material). Os resultados mostraram que, em relação à resistência ao lascamento de borda, o maior e o menor valor foram encontrados para o RNC e PICN, respectivamente, sendo que os grupos LRGC e FC apresentaram valores intermediários e não foram diferentes entre si. Quanto à resistência à flexão e o trabalho de fratura, os maiores valores também foram representados pelo grupo RCN e, os menores valores para o FC. Para o módulo de flexão, o RCN exibiu o menor valor seguido pelo PICN. Portanto, os autores concluíram que o grupo RCN demonstrou um desempenho superior para as propriedades mecânicas testadas neste estudo.

El Zhawi et al. (2016) investigaram a resistência à fratura por fadiga e o desgaste de coroas monolíticas de molares confeccionadas por um material cerâmico de matriz resinosa (Enamic). As coroas foram usinadas por um sistema CAD/CAM e cimentadas com cimento resinoso dual em pilares de resina composta. A resistência à fadiga e ao desgaste foi testada por meio de dois métodos: (1) teste acelerado de fadiga (*step-stress*) de contato deslizante (n=24) e (2) teste não acelerado de fadiga/desgaste com contato deslizante, com carga clinicamente relevante (n=8). As coroas foram imersas em água destilada durante os dois testes. Para determinar os perfis das cargas cíclicas que constituem o teste 1, quatro coroas foram submetidas ao teste de carga para fratura e, assim foram projetados três perfis de estresse (leve: 400 – 1200 N, 170 K ciclos; moderado: 500 – 1400 N, 120 k ciclos; agressivo: 600 – 1700 N, 70 K ciclos). O teste 2 procurou simular aproximadamente 5 anos de função clínica (carga máxima de 200 N, 2 Hz, 1,25 milhões de ciclos). Das 24 coroas submetidas ao teste 1, 3 coroas falharam (2

lascaram - uma do perfil moderado e outra do leve; 1 sofreu fratura em massa no perfil leve). Através da análise fractográfica, observou-se uma série de características de fratura que indicaram a sua origem na superfície oclusal, na região da cicatriz da fadiga. Em relação ao teste 2, as coroas mostraram apenas um pequeno desgaste na superfície deslizante e nenhuma falha foi observada. A caracterização microestrutural mostrou uma rede cerâmica com aproximadamente 25% de porosidade. O elemento mais abundante foi silício, seguido de alumínio, potássio e sódio, elementos comuns encontrados em cerâmicas feldspáticas. As imagens também confirmaram a presença de uma fase orgânica de polímeros. Os autores concluíram que as coroas de cerâmica de matriz resinosa apresentaram excelente resistência à fadiga, já que as falhas só foram observadas sob cargas muito elevadas ( $> 1000$  N), o que sugere que as fraturas precoces das coroas são improváveis. Além disso, o material apresentou boa resistência ao desgaste sob condições de carga clinicamente relevante.

Homaei et al. (2016) avaliaram as propriedades mecânicas e o comportamento sob fadiga de três cerâmicas: zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítrio (zircônia Cercon - ZC), dissilicato de lítio (IPS E-max CAD -LD) e cerâmica infiltrada com polímero (Enamic, Vita – PIC). A resistência à flexão e o módulo de Young (E) foram obtidos por meio do ensaio de flexão de três pontos ( $n=15$ ). Para análise do comportamento de fadiga, foram testadas 24 amostras em forma de barra (7 para ZC e PIC; 10 para LD), o ensaio foi realizado por flexão de 3 pontos, com carga cíclica com 8 Hz e carga mínima de 3 N. A tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) foi mensurada através do método de entalhe (“*single edge V-notch beam*” – SEVNB). O teste de microdureza foi realizado com um indentador de Vickers (carga de 1,962 N; por 15 s; 12 medições em cada amostra). As superfícies fraturadas das

amostras foram analisadas no MEV, para caracterização microestrutural e, no espectrômetro por energia dispersiva (EDS), para avaliação da composição química. Os resultados das propriedades mecânicas estão demonstrados na tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Resultados das propriedades mecânicas das três cerâmicas estudadas (Fonte: Homaei et al., 2016)

<b>Propriedades mecânicas: média (desvio padrão)</b>				
<b>Material</b>	<b>Resistência à flexão (MPa)</b>	<b>Módulo elástico (GPa)</b>	<b>Tenacidade à fratura (MPa m<sup>1/2</sup>)</b>	<b>Dureza (H<sub>v</sub>)</b>
<b>ZC</b>	886.9 (80.2) <sup>a</sup>	146.5 (11.0) <sup>a</sup>	6.6 (0.6) <sup>a</sup>	1641.7 (303.3) <sup>a</sup>
<b>LD</b>	356.7 (59.6) <sup>b</sup>	95.9 (6.4) <sup>b</sup>	2.8 (0.1) <sup>b</sup>	676.7 (66.4) <sup>b</sup>
<b>PIC</b>	135.8 (8.3) <sup>c</sup>	30.1 (1.8) <sup>c</sup>	1.4 (0.1) <sup>c</sup>	261.7 (12.3) <sup>c</sup>

As propriedades mecânicas da ZC foram superiores às outras cerâmicas testadas. A resistência à fadiga mais alta foi observada para ZC, enquanto PIC exibiu a mais baixa. No entanto, a diferença de tensão do limite de fadiga entre o ciclo mais baixo (10<sup>3</sup> ciclos) e o mais alto (10<sup>6</sup> ciclos) foi de aproximadamente 60 MPa para a ZC, 12 para PIC e 7 para LD. A superfície de fratura devido à fadiga se mostrou aparentemente mais regular do que aquela devida à carga estática (teste de flexão).

Lawson et al. (2016) mensuraram a resistência à flexão, o módulo elástico, a dureza e o desgaste de alguns materiais para uso CAD/CAM, sendo eles: dissilicato de lítio (E-max CAD), silicato de lítio reforçado com zircônia (Celtra Duo), três resinas compostas (Cerasmart, Lava Ultimate, Paradigm MZ100) e uma cerâmica de matriz resinosa (Enamic). Foi realizado o ensaio de flexão em três pontos e, para o teste de dureza, foram feitas 5 indentações em cada amostra, utilizando um indentador Vickers. Para avaliar o desgaste, as amostras foram colocadas na máquina de teste de desgaste com contato deslizante. Como antagonistas foram selecionados pré-molares que tiveram suas cúspides padronizadas. Antes e após o ensaio, as cúspides e os materiais testados foram escaneados com um perfilômetro



e o desgaste volumétrico de cada material e cúspide de esmalte oposta foi determinado com um software de superposição. A análise microestrutural foi realizada por MEV e por espectroscopia de energia dispersiva de raios-x (EDS). Os resultados mostraram que o silicato de lítio reforçado com zircônia exibiu o maior valor de resistência à flexão, seguido pelo dissilicato de lítio e que, nenhum dos materiais híbridos (Cerasmart, Lava Ultimate, Paradigm MZ100 e Enamic) alcançaram valores de resistência à flexão estatisticamente comparáveis ao dissilicato de lítio. O módulo elástico e a dureza dos materiais de resina composta foram menores do que os dos materiais cerâmicos vítreos (E-max CAD e Celtra Duo) e, a cerâmica de matriz resinosa apresentou valores intermediários. A observação das faixas de desgaste mostrou que os materiais de baixo módulo elástico (Cerasmart, Lava Ultimate e Paradigm MZ100) demonstraram sinais de fadiga – trincas na região de desgaste, enquanto que os materiais de alto módulo (Enamic, E.max, Celtra Duo e esmalte) demonstraram sinais de desgaste abrasivo – ranhuras suaves e pequenos lascamentos. A análise por EDS do Enamic confirmou que a matriz cerâmica contém a composição elementar da cerâmica feldspática (Si, O, Al, Na e K) enquanto que o polímero é composto principalmente de carbono e oxigênio. Os autores concluíram que o material cerâmico de matriz resinosa e as resinas compostas demonstraram uma resistência ao desgaste adequada para restaurações que recebem cargas oclusais, desde que possuam uma espessura pelo menos semelhante à das restaurações de dissilicato de lítio, devido à sua menor resistência.

Ramos et al. (2016) caracterizaram a microestrutura e o crescimento lento de trincas (SCG) das seguintes cerâmicas: feldspática (Vita Mark II) - FEL; infiltrada com polímero (Vita Enamic) - PIC; dissilicato de lítio (IPS e.max CAD) - DL; silicato

de lítio reforçado com zircônia (Vita Suprinity) - ZLS. Foram fabricados 60 discos de cada material pela tecnologia CAD/CAM. As amostras foram examinadas em MEV para observação das formas e tamanhos dos grãos, e, a análise química dos microconstituintes foi realizada por EDS. O difratômetro de raios X (DRX) foi utilizado para visualizar o padrão de cristalização. No grupo PIC também foi realizado a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) para determinar a composição molecular dos componentes orgânicos e inorgânicos deste material. O módulo de elasticidade foi mensurado pelo método pulso-eco. A determinação da tenacidade à fratura baseou-se na descrição de um defeito superficial gerado no teste de flexão biaxial após a realização de indentações Knoop nas amostras (método "*surface crack in flexure*"). A flexão biaxial sob cinco taxas de estresse constante (0,006; 0,06; 0,6; 6 e 60 MPa/s) foi empregada para indicar os parâmetros SCG. Em relação à caracterização microestrutural por DRX, apenas o FEL apresentou leucita como fase cristalina, o grupo PIC não teve evidência de cristalização. Os cristais do LD apresentaram formato acicular e após o condicionamento com ácido fluorídrico, se mostraram maiores e mais alongados, já os cristais do ZLS não puderam ser observados sem o ataque ácido, no entanto, após condicionamento, notou-se que estes cristais eram ligeiramente maiores e mais arredondados em comparação com os do LD. Em relação às medições de resistência intrínseca do material, isto é, efetuadas na ausência de SCG, o FEL mostrou a menor resistência e o LD mostrou o valor mais elevado. O módulo de elasticidade do PIC foi o significativamente menor em comparação com os demais materiais. FEL e PIC foram os menos susceptíveis ao SCG, uma vez que seus coeficientes de SCG foram maiores do que os obtidos para LD e ZLS. Não foram detectadas diferenças significativas entre os materiais quanto à tenacidade à fratura.

A partir da análise fractográfica, foi possível notar que as origens da fratura estavam principalmente relacionadas a falhas estruturais nas superfícies sob tensão de tração. Os autores concluíram que o polímero presente no PIC e a zircônia presente no ZLS não melhoraram a sua tenacidade à fratura. As quatro cerâmicas estudadas possuem microestruturas muito diferentes e o PIC apresenta duas fases, uma orgânica e outra inorgânica, formando assim uma rede.

Goujat et al. (2017) determinaram e compararam as propriedades mecânicas e o ajuste interno de 4 materiais para CAD/CAM: 2 resinas nanocerâmicas (Cerasmart e Lava Ultimate), 1 cerâmica de matriz resinosa (Vita Enamic) e 1 cerâmica de dissilicato de lítio (IPS e-max). Para mensurar a resistência à flexão e o módulo flexural, as amostras foram submetidas ao ensaio de flexão em três pontos. A tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) foi avaliada pelo método de entalhe (“single edge V-notch beam”) e a dureza, por meio de indentações Vickers (carga de 9,8 N por 20 segundos). Para verificar a adaptação interna, foram preparadas cavidades MOD em 60 molares. Quinze inlays de cada material foram fresadas usando o sistema CEREC Inlab. O ajuste foi medido usando a técnica da réplica e estereomicroscopia em 9 locais pré-selecionados. Os resultados mostraram que a resistência à flexão do Cerasmart (216,5 MPa) e IPS e-max (210,2 MPa) foram significativamente maiores do que da Lava Ultimate (172,8 MPa) e Vita Enamic (148,7 MPa). O módulo flexural mais alto foi do IPS e-max ( $52,8 \pm 10,5$  GPa), o que foi significativamente maior do que os demais materiais testados. Os valores de dureza Vickers mais baixos foram exibidos pelas resinas nanocerâmicas (Cerasmart = 0,66 GPa; Lava Ultimate = 0,95 GPa), enquanto que o IPS e-max (5,98 GPa) mostrou o maior valor. IPS e-max ( $1,8$  MPa.m<sup>1/2</sup>) e Lava Ultimate ( $1,6$  MPa.m<sup>1/2</sup>) apresentaram valores mais elevados de tenacidade à fratura do que Vita Enamic ( $1,4$  MPa.m<sup>1/2</sup>) e Cerasmart ( $1,4$  MPa.m<sup>1/2</sup>).

A desadaptação interna média foi significativamente maior para Lava Ultimate do que para IPS e-max ou Cerasmart ( $p < 0.05$ ), mas não para Vita Enamic ( $p > 0.05$ ). Os autores concluíram que o IPS e-max e o Cerasmart foram observados como superiores na resistência à flexão e melhor ajuste interno, e ainda, que as propriedades mecânicas parecem depender mais da composição estrutural do material do que da sua composição química.

Sonmez et al. (2018) avaliaram as características mecânicas e microestruturais de vários materiais para CAD/CAM: cerâmica feldspática (Vita Mark II - VIT), cerâmica à base de leucita (IPS Empress - EMP), cerâmica à base de dissilicato de lítio (IPS e-max - MAX), cerâmica de matriz resinosa (Vita Enamic - ENA) e resina nanocerâmica (Lava Ultimate - ULT). O DRX foi utilizado para determinar as fases cristalinas e o EDS para investigar o conteúdo químico dos materiais. Cada grupo foi dividido em dois ( $n=10$ ), um subgrupo foi submetido a termociclagem ( $5^{\circ}\text{C}$  e  $55^{\circ}\text{C}$  por 30s, 10.000 ciclos) e o outro foi armazenado em ambiente seco. A resistência à flexão foi avaliada pelo ensaio de flexão de três pontos. A dureza e a tenacidade à fratura foram mensuradas em um microdurômetro por meio de indentações Vickers. Uma amostra fraturada de cada grupo foi avaliada no MEV. Os resultados da análise por EDS mostraram que ULT e ENA contêm proporções iguais de componentes cerâmicos (inorgânicos), no entanto, além de proporções semelhantes de  $\text{SiO}_2$ , ULT apresenta  $\text{ZrO}_2$  e ENA contém  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ . VIT, EMP e MAX apresentaram altas proporções de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e outros óxidos metálicos. Foi observado que ULT, ENA e VIT são materiais amorfos sem fases diferentes. EMP e MAX tiveram pontos de foco de cristalização orientados aleatoriamente. Os picos dominantes referem-se a cristais de leucita para EMP e cristais de dissilicato de lítio para MAX. A resistência à flexão, dureza e tenacidade à

fratura dos materiais ULT e ENA diminuíram significativamente após a termociclagem, já os demais (MAX, EMP e VIT) não apresentaram influência da termociclagem. O dissilicato de lítio exibiu a maior resistência à flexão e a cerâmica feldspática, a menor. A dureza e tenacidade à fratura dos grupos VIT, EMP e MAX foram significativamente maiores em comparação com ULT e ENA. A análise no MEV, mostrou que o material ULT apresentou microfissuras entre os componentes inorgânicos e orgânicos após a ciclagem, já ENA exibiu defeitos na estrutura uniforme do material. Nenhuma distorção na estrutura foi observada após termociclagem nos grupos VIT, EMP e MAX. Sendo assim, a ciclagem térmica afetou negativamente as propriedades acima mencionadas de ULT e ENA.

### 3 PROPOSIÇÃO

A presente pesquisa teve o objetivo de avaliar o comportamento mecânico de diferentes materiais restauradores indicados para CAD/CAM - cerâmica de dissilicato de lítio, cerâmica feldspática, cerâmica de matriz resinosa e compósito nanohíbrido, cimentados adesivamente a um substrato análogo à dentina.

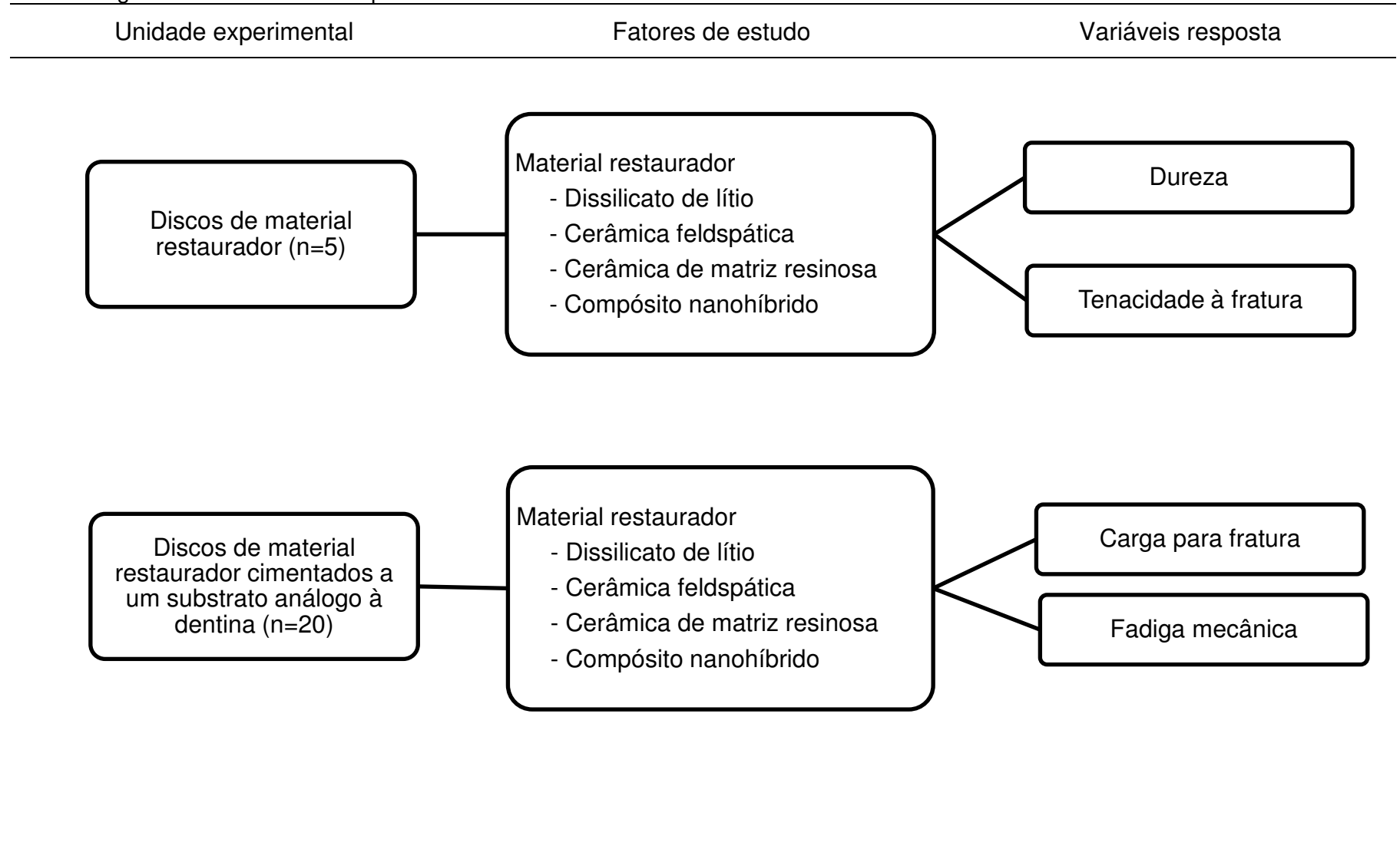
Os objetivos específicos foram:

- I) Determinar a dureza e a tenacidade à fratura dos materiais testados
- II) Determinar a carga de fratura estática e a fadiga mecânica dos materiais restauradores unidos adesivamente ao substrato de NG10 (complexo: material restaurador-cimento-NG10)
- III) Realizar a análise de fratura das amostras submetidas aos testes mecânicos

## 4 METODOLOGIA

A tabela 3 representa o fluxograma desta pesquisa no eixo horizontal bem como o delineamento experimental no eixo vertical.

Tabela 3 – Fluxograma e delineamento experimental do estudo





Para esta pesquisa foram utilizados os materiais restauradores descritos na tabela 4 e os materiais para cimentação descritos na tabela 5.

Tabela 4 - Descrição dos materiais restauradores utilizados (informações do fabricante)

<b>Material</b>	<b>Nome comercial e fabricante</b>	<b>Módulo elástico (GPa)</b>	<b>Composição</b>
Cerâmica de dissilicato de lítio	IPS e.max CAD Ivoclar Vivadent (Schaan, Liechtenstein)	95 ± 5	Cerâmica vítrea de dissilicato de lítio (Componentes: SiO <sub>2</sub> Conteúdo adicional: Li <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e outros óxidos)
Cerâmica feldspática	Vita Blocks Mark II Vita Zahnfabrik (Bäd Säckingen, Alemanha)	45 ± 0,5	Cerâmica feldspática (SiO <sub>2</sub> - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Na <sub>2</sub> O - K <sub>2</sub> O - CaO - TiO <sub>2</sub> )
Cerâmica de matriz resinosa	Vita Enamic Vita Zahnfabrik (Bäd Säckingen, Alemanha)	30 ± 2	Cerâmica feldspática de estrutura fina (86% em peso) + polímero de metacrilato (14% em peso)
Compósito nanohíbrido	Brava Block FGM (Joinville, Brasil)	12,2 ± 0,8 #	Carga inorgânica (72% a 82% em peso – cargas em vitrocerâmicas, sílica e pigmentos) em uma matriz resinosa altamente polimerizada (monômeros metacrílicos, iniciador, co-iniciador, estabilizantes e silano)

#Paradigm MZ100 (Quinn et al., 2014)

Tabela 5 - Descrição dos materiais utilizados para cimentação

<b>Material</b>	<b>Nome comercial/fabricante</b>
Ácido fluorídrico 10%	Condac porcelana 10% / FGM (Joinville, Brasil)
Ácido fluorídrico 5%	Condac porcelana 5% / FGM (Joinville, Brasil)
Primer (Solução alcoólica de metacrilato de silano, metacrilato do ácido fosfórico e metacrilato de sulfureto)	Monobond N / Ivoclar Vivadent (Schaan, Liechtenstein)
Cimento resinoso de polimerização dual	Variolink N / Ivoclar Vivadent (Schaan, Liechtenstein)

## 4.1 Confeção das Amostras

### 4.1.1 Obtenção dos discos dos materiais restauradores

Foram confeccionados discos (11 mm de diâmetro x 1,2 mm de espessura), a partir dos blocos pré-fabricados dos materiais restauradores mencionados na tabela 4 (n=45).

Os blocos foram usinados em cilindros de 11 mm através do desgaste no torno mecânico. Posteriormente os cilindros foram seccionados em uma máquina de corte (Isomet 1000, Buehler, Lake Bluff, EUA) para obter os discos (1,35 mm de espessura).

Todos os discos foram polidos em uma Lixadeira/Politriz semi-automática (modelo ECOMET/AUTOMET 250, Buehler, Lake Buff, EUA), usando uma lixa diamantada de 25  $\mu\text{m}$  (Resin Bond, Dia-Grid Diamond – Allied, Rancho Dominguez, California, EUA) e posteriormente uma lixa de carbetto de silício (SiC) (#1200) resultando em espessura final de  $1,2 \pm 0,1$  mm.

Os discos de dissilicato de lítio foram cristalizados no forno Programat EP 5000 (Ivoclar Vivadent - Schaan, Liechtenstein), de acordo com as instruções dos fabricantes, tabela 6.

Tabela 6 - Processo de cristalização da cerâmica de dissilicato de lítio

<b>Temperatura de início do ciclo (°C)</b>	403
<b>Tempo de fechamento (min)</b>	6:00
<b>Acréscimo de temperatura (°C/min)</b>	90
<b>Temperatura de cristalização T1 (°C)</b>	820
<b>Tempo de manutenção H1 (min)</b>	0:10

<b>Acréscimo de temperatura (°C/min)</b>	30
<b>Temperatura de cristalização T2 (°C)</b>	840
<b>Tempo de manutenção H2 (min)</b>	7:00
<b>Vácuo 1 (°C)</b>	550/820
<b>Vácuo 2 (°C)</b>	820/840
<b>Esfriamento lento (°C)</b>	700
<b>Decréscimo de temperatura (°C/min)</b>	0

#### 4.1.2 Obtenção das bases de resina epóxi

Foram confeccionados 180 discos (11 mm de diâmetro x 5 mm de espessura) de um material com comportamento análogo à dentina hidratada, composto de resina epóxi reforçada com fibras de vidro NG10 (Accurate Plastics, Inc – Yonkers, Nova York, EUA) (Yi & Kelly, 2008; Kelly et al., 2010). Estes discos foram obtidos a partir de bastões de NG10, que foram seccionados na espessura determinada e serviram como substrato base de cimentação dos discos de cada material restaurador, para a realização dos testes descritos nas seções seguintes.

#### 4.1.3 Cimentação das amostras

##### 4.1.3.1 Preparo das bases de NG10

A superfície da base de NG10 foi condicionada com ácido fluorídrico 10% durante 60 s, seguido de lavagem abundante e secagem com jato de ar. Uma

camada de primer foi aplicada na superfície de NG10, e a cimentação foi executada após 60 s.

#### 4.1.3.2 Preparo dos discos dos materiais restauradores

Os discos (n=40) foram lavados em uma cuba ultrassônica (Cristófoli Equipamentos de Biossegurança LTDA., Campo Mourão - PR - Brasil) utilizando água destilada por 10 minutos e em seguida foram secos para receber o tratamento de superfície indicado pelo fabricante:

- cerâmica de dissilicato de lítio: condicionamento com ácido fluorídrico 5% por 20 s, lavagem com jato de água por 40 s, secagem com jato de ar por 20 s, aplicação do primer (deixou reagir por 60 s e o excesso foi removido com jato de ar);

- cerâmica feldspática: condicionamento com ácido fluorídrico 5% por 60 s, lavagem, com jato de água por 120 s, secagem com jato de ar por 20 s, aplicação do primer (deixou reagir por 60 s e o excesso foi removido com jato de ar);

- cerâmica de matriz resinosa: condicionamento com ácido fluorídrico 5% por 60 s, lavagem com jato de água por 120 s, secagem com jato de ar por 20 s, aplicação do primer (deixou reagir por 60 s e o excesso foi removido com jato de ar);

- compósito nanohíbrido: condicionamento com ácido fluorídrico 10% por 60 s, lavagem, com jato de água por 120 s, secagem com jato de ar por 20 s, aplicação do primer (deixou reagir por 60 s e o excesso foi removido com jato de ar).

Após condicionamento de ambas as superfícies de cimentação (discos e base de NG10), um cimento resinoso de polimerização dual (Variolink N, Ivoclar Vivadent) foi proporcionado, manipulado e inserido sobre o substrato de NG10 e o disco do material restaurador foi posicionado sobre o cimento. Uma carga de 830 g foi aplicada sobre o disco para assentamento deste e escoamento do excesso de

cimento. O excesso de cimento foi removido e foi executada a fotoativação (Bluephase N, Ivoclar Vivadent - Schaan, Liechtenstein) por 20 segundos nas 4 laterais do conjunto (figura 4).

As amostras foram armazenadas em água a temperatura de 37°C, por pelo menos 24 horas para realização do teste de carga para fratura e por 90 dias para o ensaio de fadiga mecânica.



Figura 4 – Disco do material restaurador cimentado sobre a base de NG10

## 4.2 Ensaio Mecânicos

### 4.2.1 Dureza

Cinco (n=5) amostras em forma de discos de cada material foram utilizadas para mensurar a dureza superficial. Uma indentação Knoop foi executada no centro de cada disco, por um microdurômetro (Shimadzu MicroHardness Tester HMV G20, Shimadzu Corporation, Duisburg, Alemanha) durante 12 segundos, com a carga de

19,61N (Ramos et al., 2016). Após cada indentação, a maior diagonal foi medida para determinar a dureza (KHN – número de dureza Knoop). A distribuição dos dados foi verificada pelo teste Kolmogorov-Smirnov, e a análise estatística foi realizada pelo teste ANOVA um fator seguido de teste post-hoc de Tukey para comparação de médias ( $\alpha=0,05$ ) (Software minitab 27).

#### 4.2.2 Tenacidade à fratura

O método utilizado para mensurar a tenacidade à fratura dos materiais avaliados foi o “Surface Crack in Flexure” (SCF). Este método combina a utilização de um defeito superficial controlado, que é gerado por uma indentação Knoop, com um teste de resistência à flexão biaxial (Cesar et al., 2017).

Foram utilizadas as mesmas 5 amostras usadas para determinar a dureza. Após as indentações Knoop (carga de 19,61N por 12 segundos), as amostras foram polidas com lixa de carbetto de silício (SiC) (#1200) por 30 segundos, para remover a área de tensão residual da indentação. Posteriormente, foram submetidas à flexão biaxial a uma velocidade de 0,5 mm/min em óleo mineral até a detecção de fratura. As dimensões (profundidade e extensão) do defeito na superfície de fratura foram mensuradas utilizando um estereomicroscópio (110-150x) (Discovery V20, Carl Zeiss, Goettingen, Alemanha) e um microscópio eletrônico de varredura (150-300x) (Inspect S50, FEI, República Tcheca) (figura 5). A tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) (MPa  $m^{1/2}$ ) foi determinada de acordo com a equação:

$$K_{Ic} = \sigma_{B3B} Y \sqrt{a\pi}$$

onde,

$\sigma_{B3B}$  = é a resistência biaxial com o método “Ball on three-Balls” (B3B) (que foi calculada pelo site <http://www.isfk.at/en/960/>);

$Y =$  é um fator geométrico adimensional que depende da geometria do defeito, da amostra e da razão de Poisson do material (obtido através dos cálculos de Strobl et al., 2014);

$a =$  é a profundidade do defeito (Strobl et al., 2014; Ramos et al., 2016).

A distribuição dos dados foi verificada pelo teste Kolmogorov-Smirnov, e a análise estatística foi realizada pelo teste ANOVA um fator seguido de teste post-hoc de Tukey para comparação de médias ( $\alpha=0,05$ ) (Software minitab 27).

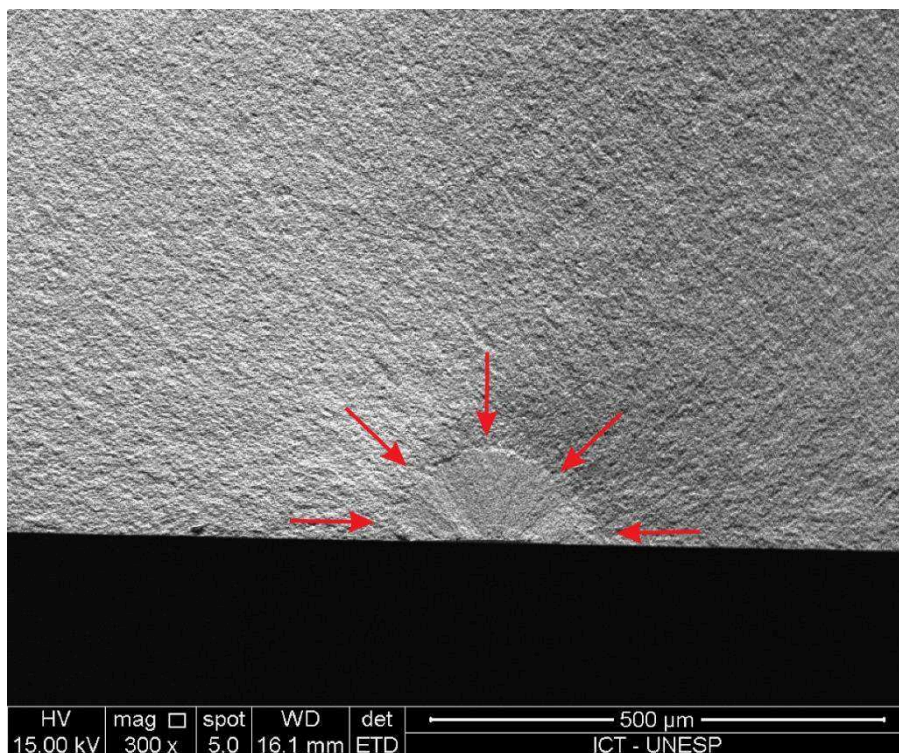


Figura 5 – Imagem do dissilicato de lítio realizada no MEV, ilustrando o defeito na superfície de fratura

#### 4.2.3 Carga para fratura

Para a execução deste teste, vinte ( $n=20$ ) amostras de cada material restaurador cimentadas à base de NG10 foram submetidas a uma carga crescente (1 mm/min) com uma célula de carga de 500 kgf, aplicada por uma ponta esférica metálica (6 mm de diâmetro) na superfície plana do material restaurador, até a

detecção de fratura por ruído sonoro ou decréscimo no gráfico tensão x deformação gerado pelo equipamento de teste (Máquina de Ensaio Universal, BioPDI, São Carlos, Brasil). Foi colada uma fita adesiva transparente (Durex – 3M, Sumaré/SP) na superfície do disco dos materiais restauradores, para que os fragmentos não se deslocassem após a fratura. A carga para fratura (N) foi registrada e posteriormente submetida à análise estatística. A distribuição dos dados foi verificada pelo teste Kolmogorov-Smirnov, e a análise estatística foi realizada pelo teste ANOVA um fator seguido de teste post-hoc de Tukey para comparação de médias ( $\alpha=0,05$ ) (Software minitab 27). A análise de Weibull, para determinação da resistência característica e confiabilidade do material, foi realizada de acordo com a norma DIN V ENV 843-5:1997-01 (IC 95%). Esta análise descreve a distribuição dos valores de resistência para materiais cerâmicos com forma e tamanho constante, a partir da equação:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(\sigma_c)} = m \ln \sigma_c - m \ln \sigma_0$$

onde,

$F(\sigma_c)$  = a probabilidade de sobrevivência a uma determinada tensão;

$\sigma_c$  = resistência mecânica inicial ou resistência inerte (tensão aplicada/carga para fratura);

$\sigma_0$  = resistência característica ou parâmetro de escala: tensão na qual 63,21% das amostras iriam falhar;

$m$  = módulo de Weibull, que expressa a distribuição dos valores de resistência.

Foi realizada a análise de fratura e as amostras foram avaliadas quanto ao número de fragmentos fraturados e classificadas quanto ao tipo de descimentação do disco do material restaurador (figura 6).



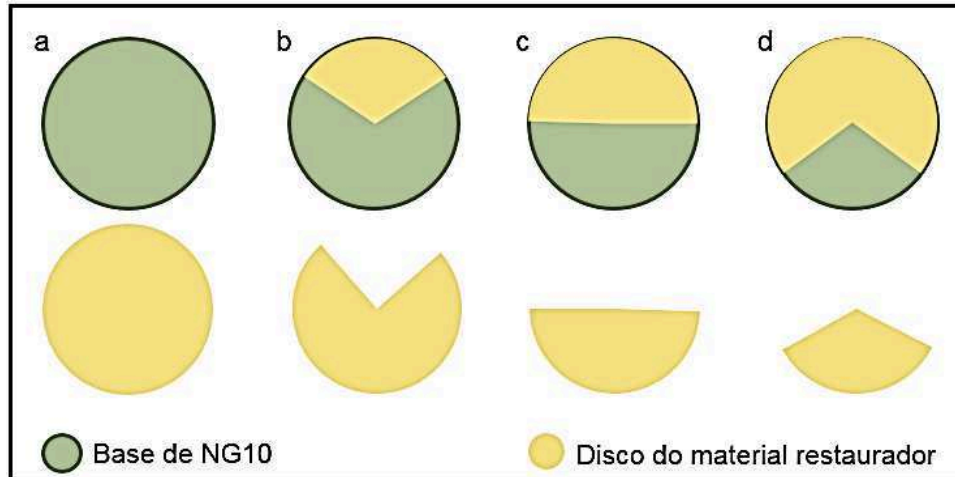


Figura 6 – Esquema da classificação das amostras quanto ao tipo de descimentação: a – descimentação total do disco; b – parcial com mais da metade do disco descimentada; c – parcial com metade do disco descimentada; d – parcial com menos da metade do disco descimentada

#### 4.2.4 Fadiga mecânica

O teste de fadiga foi realizado em uma máquina de ensaios mecânicos cíclicos (BioCycle, BioPDI). A carga aplicada foi de 400 N. As amostras de cada material restaurador cimentadas à base de NG10 (n=20) foram imersas em água, e posicionadas paralelas ao solo. Uma ponta esférica metálica de 6 mm de diâmetro aplicou a carga na região central do disco do material restaurador, a uma frequência de 5 Hz, até o limite de  $1 \times 10^6$  ciclos, com verificações a cada 200 mil ciclos, para verificação de fratura catastrófica.

Os dados obtidos pelo teste de fadiga foram submetidos à análise de Weibull para determinação de dois parâmetros, beta ( $\beta$ ) e eta ( $\eta$ ). A probabilidade de falha foi calculada para intervalos a cada 200.000 ciclos até  $1 \times 10^6$  (95% de intervalo de confiança bilateral – Synthesis 9, Weibull++ 9, Reliasoft). A análise de probabilidade de falha de Weibull forneceu o valor  $\beta$  que descreve o comportamento da taxa de falha ao longo do tempo. Os valores  $\beta < 1$  indicam que a taxa de falha diminuiu ao longo do tempo,  $\beta \sim 1$  indica que não houve variação na taxa de falha ao longo do

tempo e  $\beta > 1$  significa que a taxa de falha aumentou ao longo do tempo (Padipatvuthikul & Mair, 2008). O parâmetro  $\eta$  representa a vida característica dos espécimes, em que 63,2% das falhas ocorrem (Pittayachawan et al., 2007).

Após a fadiga mecânica, as amostras foram analisadas no estereomicroscópio (7,5x) (Discovery V20, Carl Zeiss, Goettingen, Alemanha), com transiluminação, para verificar a presença de trincas internas.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Dureza

Os valores de dureza dos materiais analisados estão relatados na tabela 7. O dissilicato de lítio foi o material que apresentou a maior dureza e o menor valor foi exibido pelo compósito nanohíbrido ( $p < 0,001$ ).

Tabela 7 - Valores médios e desvio padrão da dureza

Material	Média (KHN) *	Desvio Padrão
Dissilicato de lítio	520,4 <sup>A</sup>	20,55
Cerâmica feldspática	474,6 <sup>B</sup>	39,60
Cerâmica de matriz resinosa	176,6 <sup>C</sup>	1,81
Compósito nanohíbrido	58,26 <sup>D</sup>	1,16

\* Letras diferentes indicam diferença estatística

### 5.2 Tenacidade à fratura

Os dados referentes a tenacidade à fratura estão demonstrados na tabela 8. O compósito nanohíbrido e o dissilicato de lítio exibiram valores significativamente maiores do que as cerâmicas feldspática e de matriz resinosa ( $p < 0,001$ ).

Tabela 8 - Valores médios da  $K_{Ic}$ , desvio padrão e intervalo de confiança (95%)

Material	n	Média (MPa m <sup>1/2</sup> ) *	Desvio Padrão	IC (95%)
Dissilicato de lítio	5	2,25 <sup>A</sup>	0,39	1,91 – 2,58
Cerâmica feldspática	5	1,14 <sup>B</sup>	0,33	0,80 – 1,47
Cerâmica de matriz resinosa	5	1,18 <sup>B</sup>	0,35	0,84 – 1,51
Compósito nanohíbrido	2	2,46 <sup>A</sup>	0,20	1,93 – 2,99

\* Letras diferentes indicam diferença estatística

### 5.3 Carga para fratura

Os resultados do teste de carga para fratura estão apresentados na tabela 9. O menor valor foi obtido pelo compósito nanohíbrido, com diferença significativa para os demais materiais ( $p < 0,001$ ).

Tabela 9 - Valores médios (N) e desvio padrão do teste de carga para fratura

<b>Material</b>	<b>Média (N) *</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Dissilicato de lítio	2881,6 <sup>A</sup>	397,7
Cerâmica feldspática	3242,5 <sup>A</sup>	768,1
Cerâmica de matriz resinosa	3200,6 <sup>A</sup>	559,9
Compósito nanohíbrido	2367,5 <sup>B</sup>	392,6

\* Letras diferentes indicam diferença estatística

Os dados da análise de Weibull estão demonstrados na tabela 10. O módulo de Weibull ( $m$ ) para todos os materiais foram estatisticamente semelhantes dentro do intervalo de confiança de 95%. O compósito nanohíbrido exibiu a menor resistência característica ( $\sigma_0$ ), sendo significativamente inferior aos demais materiais (não sobreposição dos intervalos de confiança).

Tabela 10 - Análise de Weibull do teste de carga para fratura

<b>Material</b>	<b>m</b>	<b>IC (95%)</b>	<b><math>\sigma_0</math></b>	<b>IC (95%)</b>
Dissilicato de lítio	8,18	5,18 - 9,76	3056,714	2858,29 - 3265,31
Cerâmica feldspática	4,73	2,90 - 6,44	3546,285	3134,38 - 4007,22
Cerâmica de matriz resinosa	6,81	4,31 - 8,13	3425,907	3160,56 - 3708,63
Compósito nanohíbrido	6,25	3,96 - 7,46	2552,684	2338,02 - 2783,04

$m$  - módulo de Weibull; IC (95%) - intervalo de confiança de 95%;  $\sigma_0$  - resistência característica

As figuras 7, 8, 9 e 10 representam os gráficos do número de fragmentos e a carga para fratura de todas as amostras dos materiais testados: dissilicato de lítio,

cerâmica feldspática, cerâmica de matriz resinosa e compósito nanohíbrido, respectivamente. É possível observar, pela linha de tendência linear, que o número de fragmentos aumenta em função do aumento da carga para fratura, exceto para a cerâmica feldspática.

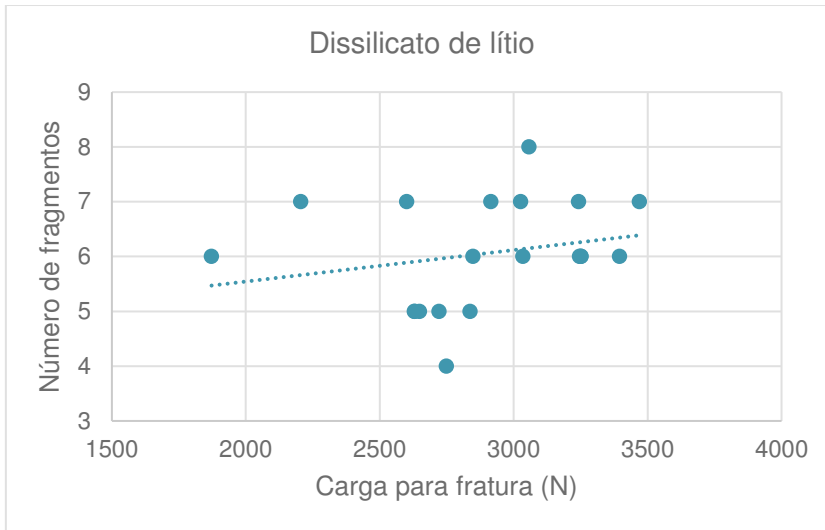


Figura 7 – Gráfico do número de fragmentos e carga para fratura das amostras do dissilicato de lítio

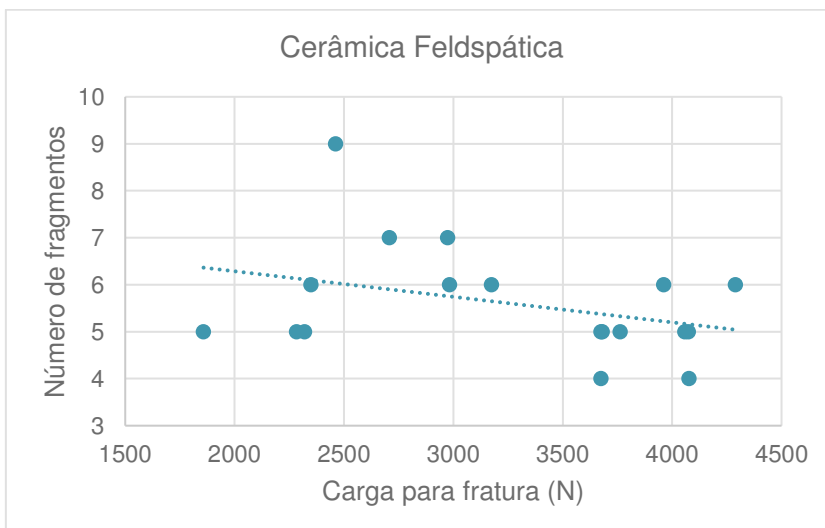


Figura 8 – Gráfico do número de fragmentos e carga para fratura das amostras da cerâmica feldspática

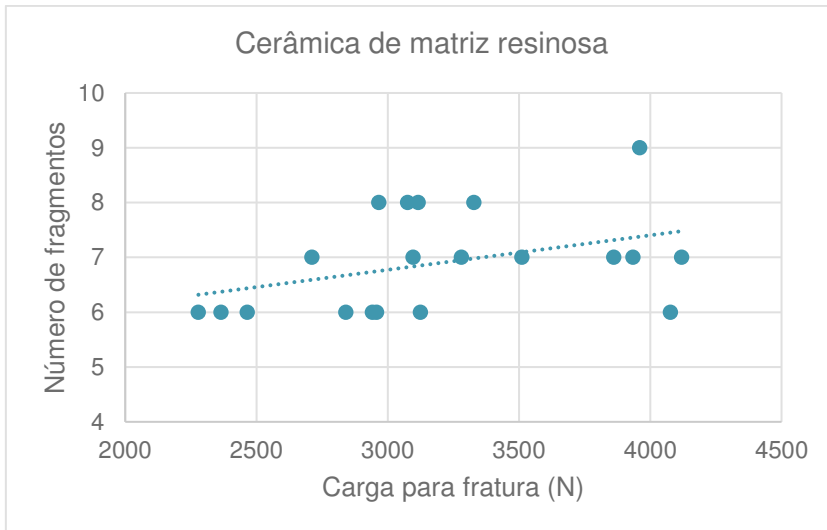


Figura 9 – Gráfico do número de fragmentos e carga para fratura das amostras da cerâmica de matriz resinosa

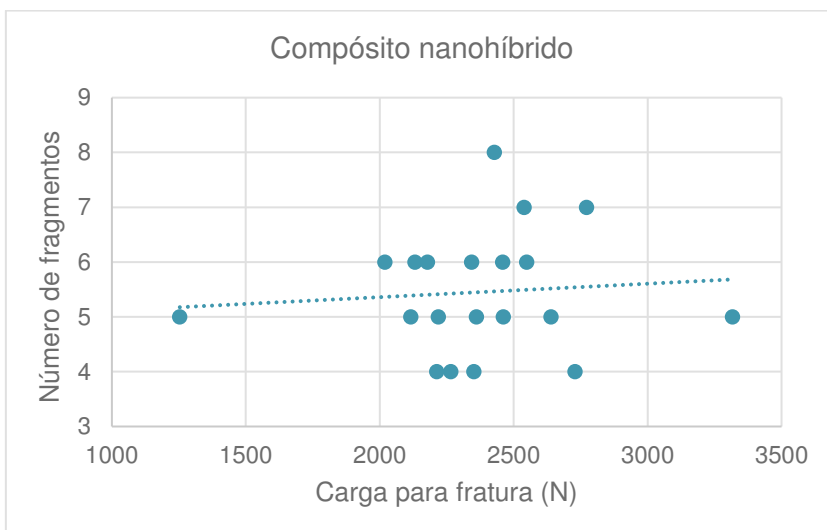


Figura 10 – Gráfico do número de fragmentos e carga para fratura das amostras do compósito nanohíbrido

A figura 11 mostra a classificação quanto a descimentação das amostras submetidas ao teste de carga para fratura e a figura 12 ilustra uma amostra de cada material após o teste.

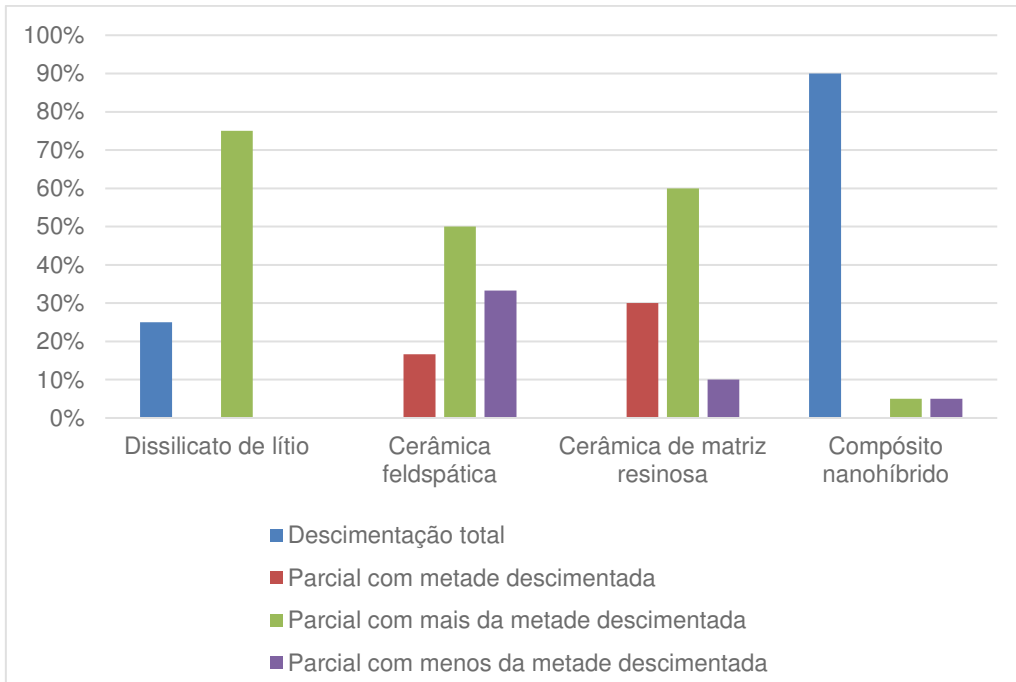


Figura 11 – Gráfico da classificação das amostras, após o teste de carga para fratura, quanto ao tipo de descimentação, em porcentagem

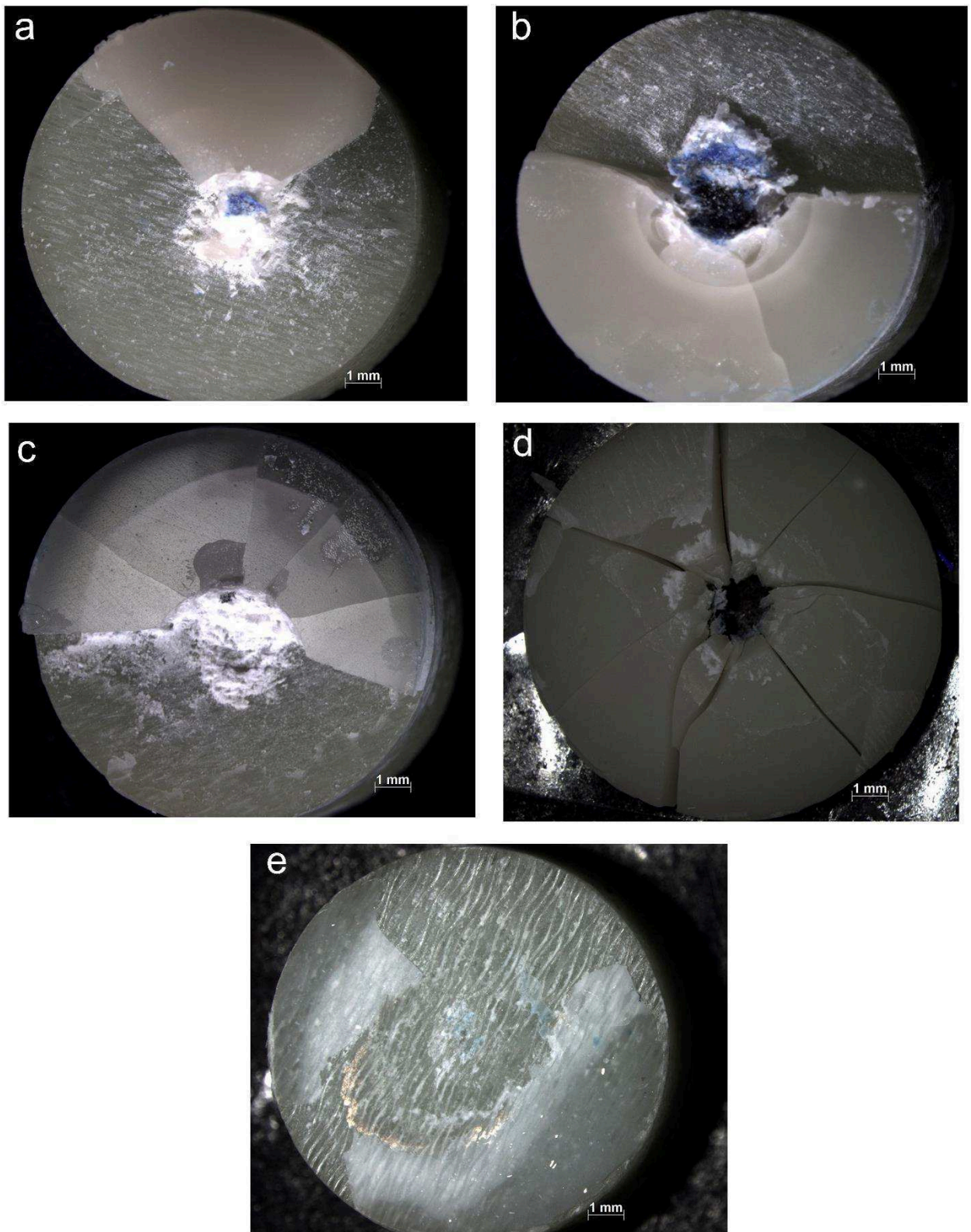


Figura 12 – Fotos das amostras, após o teste de carga para fratura, realizada no estereomicroscópio (7,5x). a – dissilicato de lítio, com mais da metade do disco descimentada; b – cerâmica feldspática, com menos da metade do disco descimentada; c – cerâmica de matriz resinosa, com metade do disco descimentada; d – disco do composto nanohíbrido, descimentação total do disco; e – substrato de NG10 do disco da letra d



## 5.4 Fadiga mecânica

Os parâmetros da análise Weibull estão apresentados na tabela 11 e a probabilidade de falha está ilustrada nas figuras 13, 14, 15, 16. Apenas descimentação e fratura catastrófica foram consideradas como falhas para esta análise. Os valores de  $\beta = 1$  indicam que não houve variação na taxa de falha ao longo do tempo, para todos os materiais avaliados.

Tabela 11 - Parâmetros da análise de Weibull, para o intervalo de confiança de 95%, dos materiais submetidos ao teste de fadiga mecânica

<b>Material</b>	<b><math>\beta</math> (beta)</b>	<b><math>\eta</math> (eta)</b>
Dissilicato de lítio	1,000000	1,989983E+07
Cerâmica feldspática	1,000000	6,676164E+06
Cerâmica de matriz resinosa	1,000000	6,676164E+06
Compósito nanohíbrido	1,000000	9,499649E+06

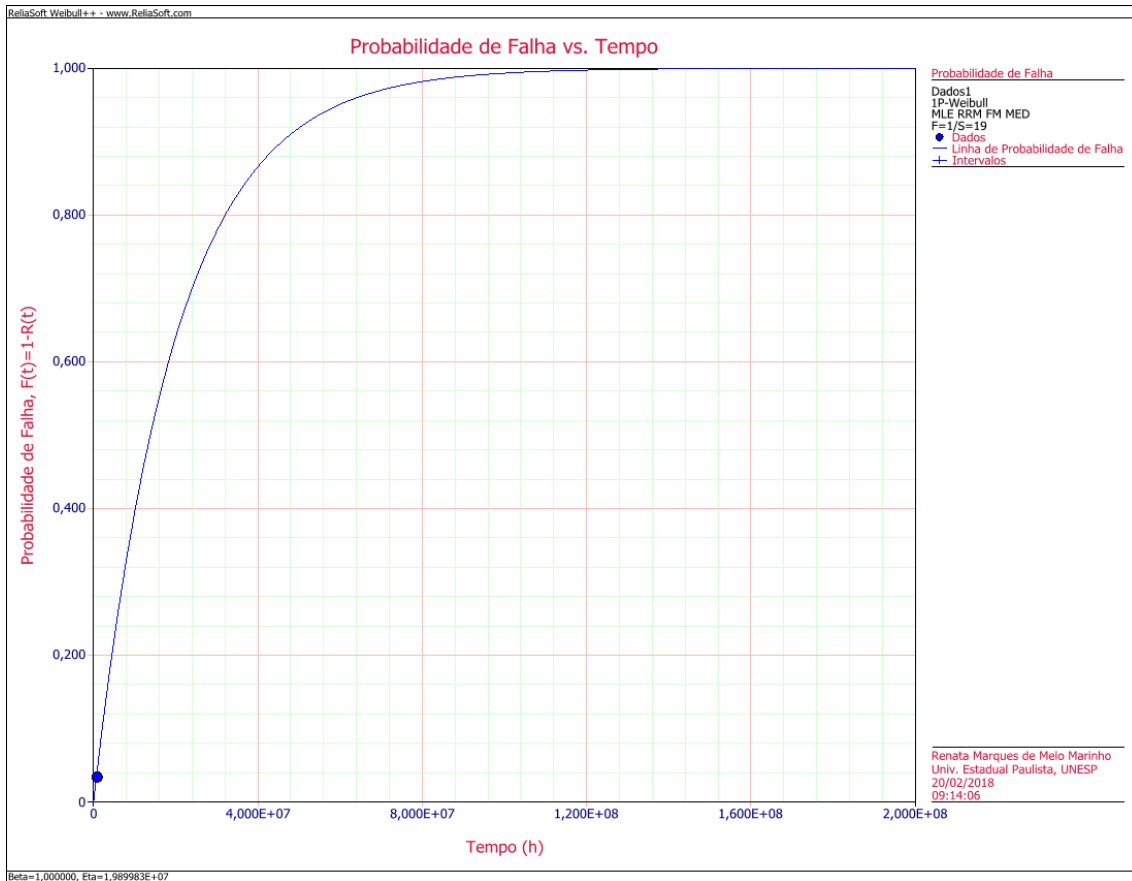


Figura 13 – Gráfico da probabilidade de falha do dissilicato de lítio

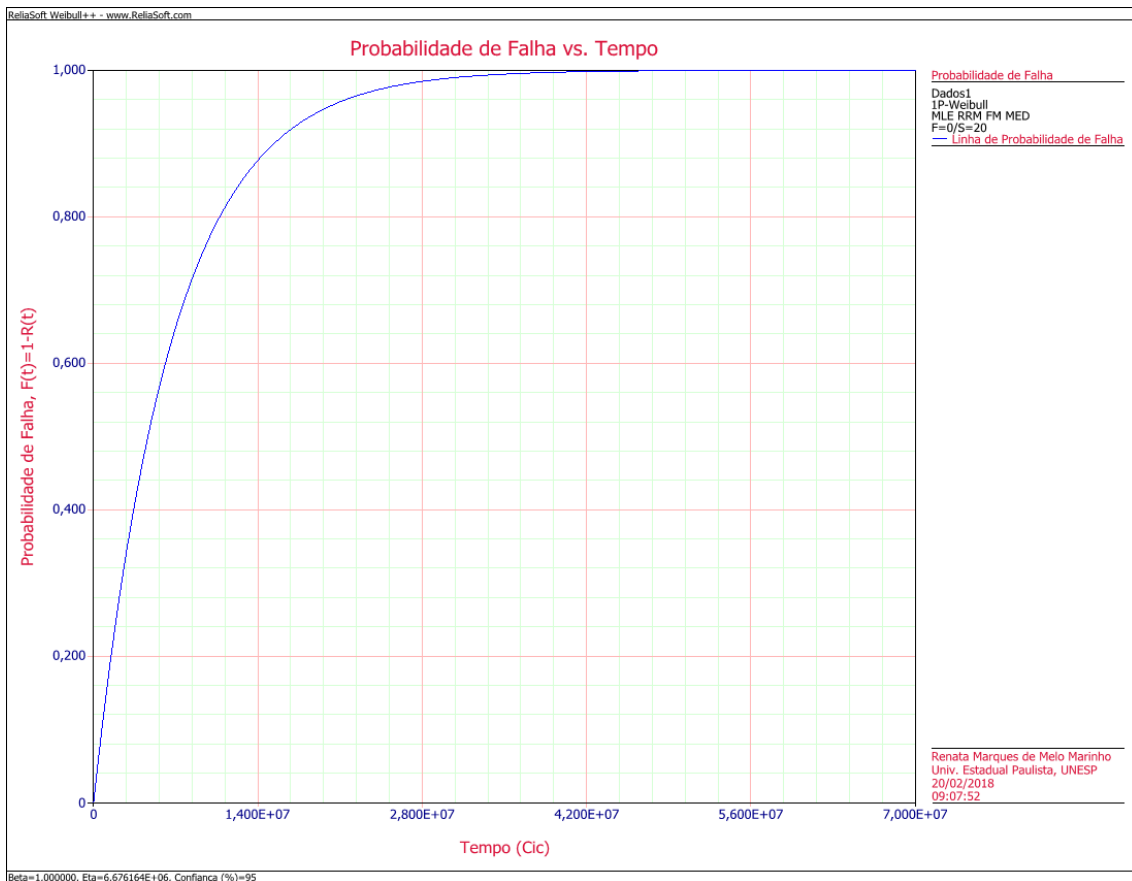


Figura 14 – Gráfico da probabilidade de falha da cerâmica feldspática

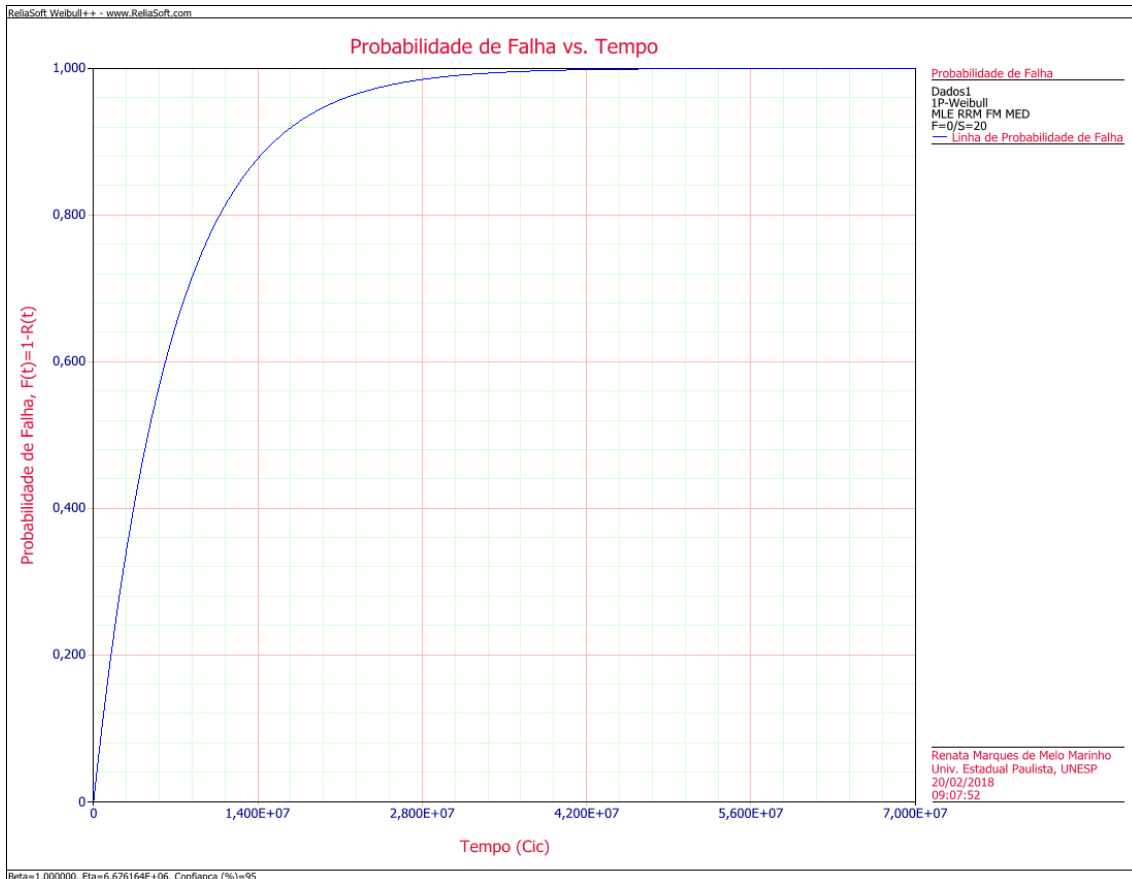


Figura 15 – Gráfico da probabilidade de falha da cerâmica de matriz resinosa

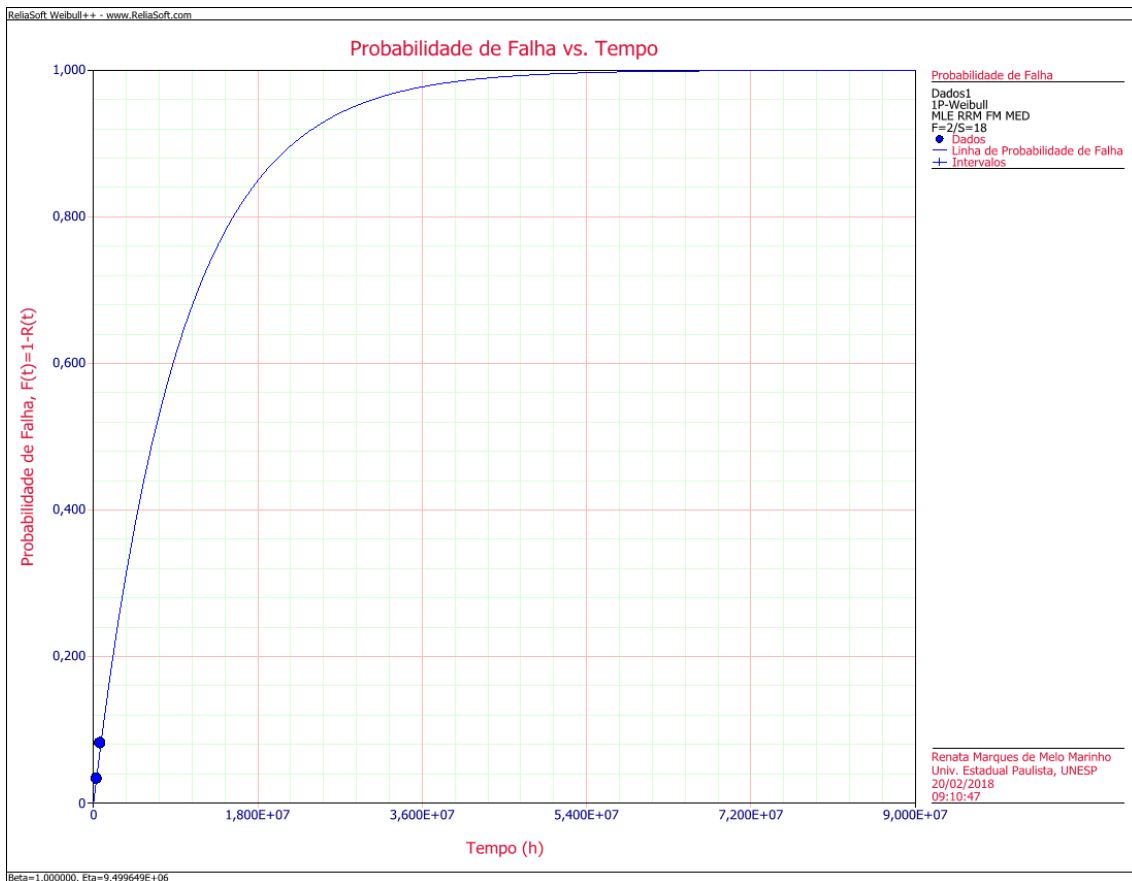


Figura 16 – Gráfico da probabilidade de falha do compósito nanohíbrido

A figura 17 demonstra a situação das amostras após o teste de fadiga e a figura 18 ilustra uma amostra de cada material. Dentre as amostras do dissilicato de lítio apenas uma apresentou fratura catastrófica após 1.000.000 de ciclos, o mesmo aconteceu para o compósito nanohíbrido. O compósito nanohíbrido foi o único grupo a apresentar uma amostra descimentada, após 200 mil ciclos.

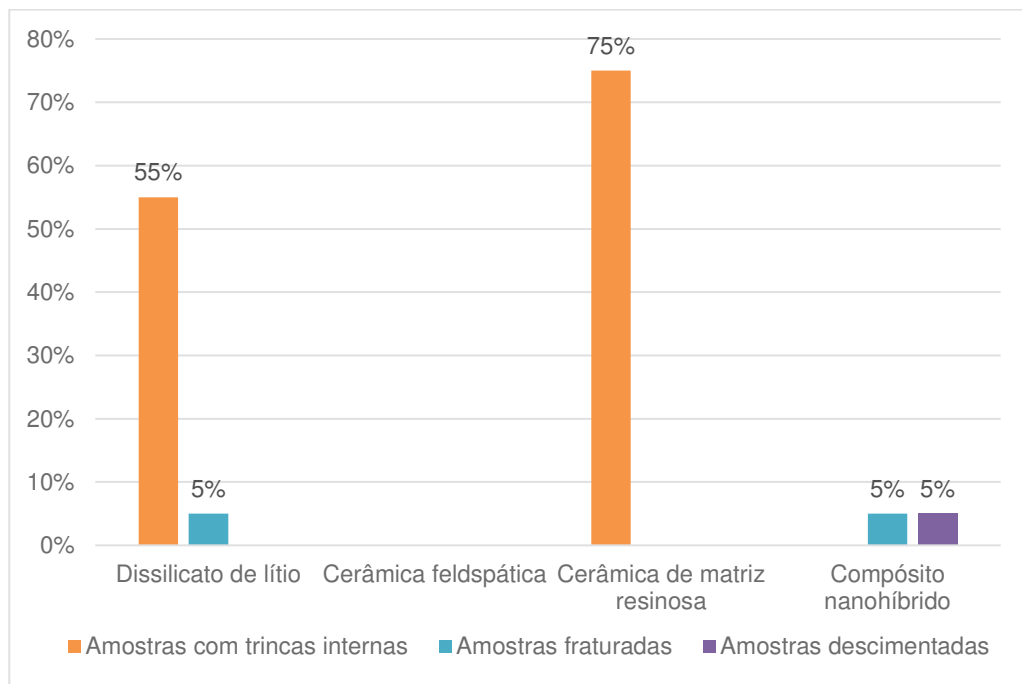


Figura 17 – Gráfico da condição das amostras após o teste de fadiga

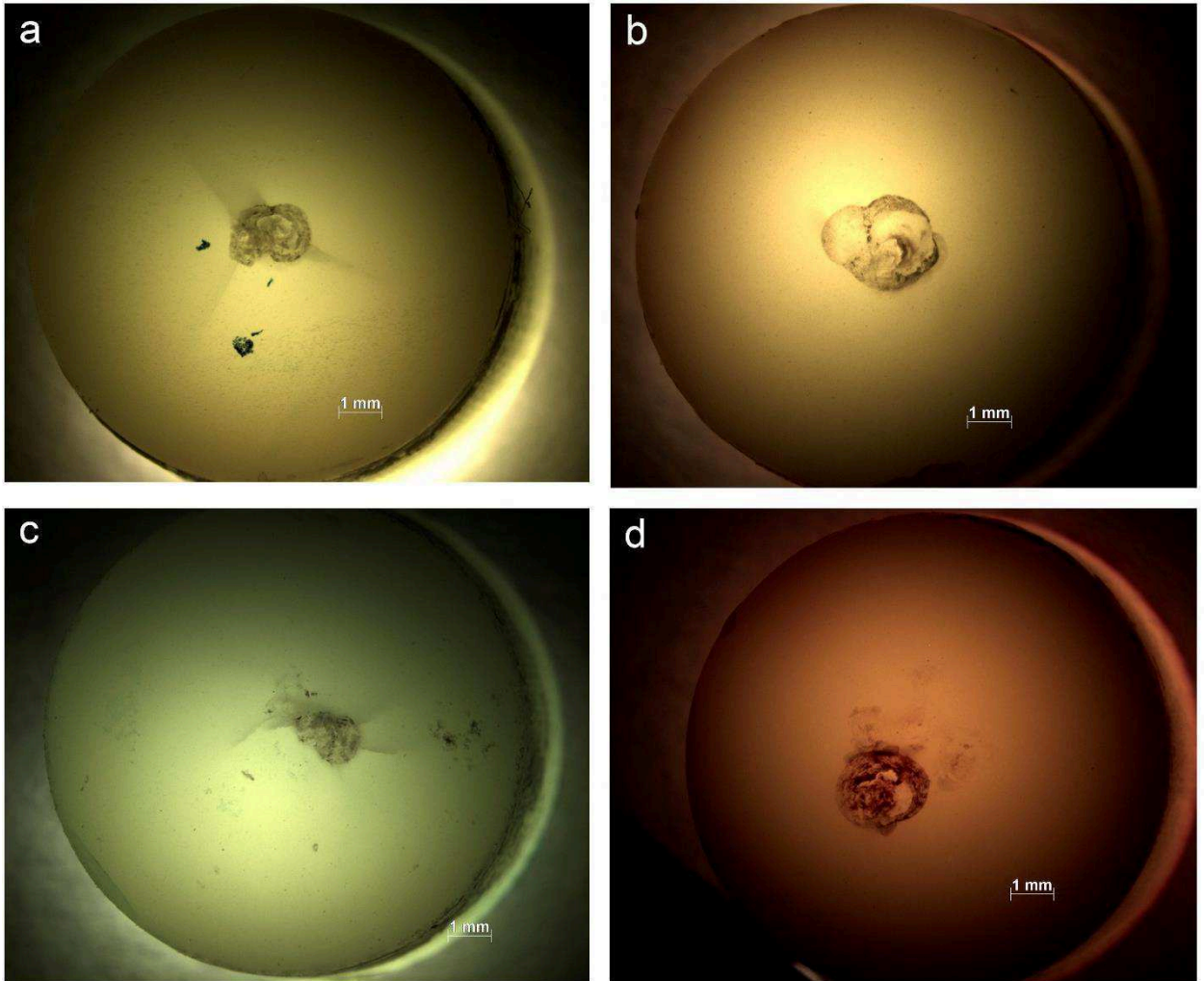


Figura 18 – Fotos das amostras, após o teste de fadiga mecânica, realizada no estereomicroscópio (7,5x) com transiluminação. a – dissilicato de lítio; b – cerâmica feldspática; c – cerâmica de matriz resinosa; d – compósito nanohíbrido

## 6 DISCUSSÃO

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de quatro diferentes materiais restauradores indicados para CAD/CAM. A hipótese de que as restaurações à base de cerâmica com matriz resinosa apresentassem melhor desempenho nos testes realizados foi negada. O dissilicato de lítio apresentou maior dureza em relação aos demais grupos. A tenacidade à fratura foi mais alta para o dissilicato de lítio e o compósito nanohíbrido. O compósito nanohíbrido apresentou menor carga para fratura e a cerâmica feldspática apresentou melhor desempenho sob fadiga, levando em consideração a presença de trincas internas.

Em condições clínicas, a restauração faz parte de um complexo formado pelo material restaurador, agente cimentante e o substrato de suporte, cada um apresentando comportamentos e propriedades diferentes (Salazar Marocho, 2012). A similaridade no módulo elástico dos materiais restauradores com a dentina resulta em uma distribuição de tensão mais uniforme, o que representa um fator determinante na longevidade das restaurações (Tay & Pashley, 2007; Coldea et al., 2013). Sendo assim, o material selecionado como estrutura de suporte para cimentação dos discos dos materiais avaliados foi a resina epóxi reforçada com fibras de vidro NG10 (Yi & Kelly, 2008; Kelly et al., 2010). Esta resina permite simular as falhas que ocorrem no meio intraoral e realizar testes laboratoriais com validade, visto que apresenta comportamento à tensão e deformação semelhante à dentina hidratada (Kelly et al., 2010).

Os resultados desta pesquisa mostraram que dentre os materiais avaliados, o dissilicato de lítio foi o que apresentou a maior dureza e a menor foi exibida pelo

compósito nanohíbrido. A cerâmica feldspática e a de matriz resinosa mostraram valores intermediários, sendo que houve diferença significativa entre todos os materiais. Estes dados estão de acordo com Albero et al. (2015), Homaei et al. (2016), Lawson et al. (2016), Goujat et al. (2017) e Sonmez et al. (2018) que encontram maior dureza para o dissilicato de lítio quando comparado a cerâmica de matriz resinosa; no estudo conduzido por Albero et al. (2015) a cerâmica feldspática também apresentou dureza entre estes dois materiais, já para Sonmez et al. (2018) a dureza da cerâmica feldspática foi similar à do dissilicato de lítio. O menor valor de dureza apresentado pela cerâmica de matriz resinosa e pelo compósito nanohíbrido é considerado uma vantagem por promover menor abrasão à dentição antagonista (Coldea et al., 2013), além de facilitar o processo de fresagem destes materiais (Lawson et al., 2016).

A dureza está relacionada com a composição química e estrutural dos materiais, assim, a maior dureza para o dissilicato de lítio, se deve provavelmente à adição dos cristais de dissilicato de lítio em sua composição, que atuam como agentes de reforço da fase vítrea, assim essa cerâmica apresenta maior proporção desta fase quando comparada com as convencionais. Já o menor valor exibido pelo compósito em detrimento da cerâmica de matriz resinosa pode ser explicado pelas suas diferenças microestruturais, visto que a cerâmica de matriz resinosa é composta por uma rede cerâmica porosa (86% em peso) que é infiltrada com um polímero por ação capilar, apresentando um sistema interligado de duas fases, enquanto que no compósito as partículas de carga inorgânicas são incorporadas em uma matriz polimérica sem interligações (Coldea et al., 2013). Albero et al. (2015) ressaltam ainda, que a menor dureza dos materiais cerâmicos de matriz resinosa em

comparação com as cerâmicas vítreas pode estar relacionada ao seu menor conteúdo inorgânico.

A tenacidade à fratura foi semelhante para o dissilicato de lítio ( $2,25 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) e o compósito nanohíbrido ( $2,46 \text{ MPa m}^{1/2}$ ), que foram superiores as cerâmicas feldspática ( $1,14 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) e de matriz resinosa ( $1,17 \text{ MPa m}^{1/2}$ ). O presente estudo utilizou a mesma metodologia de Ramos et al. (2016), que também encontraram valores semelhantes para cerâmicas feldspática ( $0,84 \pm 0,06 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) e de matriz resinosa ( $0,86 \pm 0,27 \text{ MPa m}^{1/2}$ ), no entanto, o valor obtido para o dissilicato de lítio ( $1,23 \pm 0,26 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) foi inferior ao desta pesquisa. Em contrapartida, nos resultados demonstrados por Sonmez et al. (2018), as cerâmicas feldspática ( $2,34 \pm 0,04 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) e de dissilicato de lítio ( $1,67 \pm 0,03 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) exibiram valores semelhantes e estes foram significativamente maiores quando comparados a cerâmica de matriz resinosa ( $1,23 \pm 0,02 \text{ MPa m}^{1/2}$ ). A diferença em relação a este estudo por ser atribuída à distintas metodologias. Homaei et al. (2016) e Goujat et al. (2017), utilizaram o método “*single edge V-notch beam*”, e obtiveram a mesma tenacidade à fratura para a cerâmica de matriz resinosa ( $1,4 \text{ MPa m}^{1/2}$ ), porém os valores exibidos pelo dissilicato de lítio foram discrepantes,  $2,8$  e  $1,8 \text{ MPa m}^{1/2}$ , respectivamente.

A tenacidade à fratura é uma propriedade intrínseca de um material, que se relaciona com a sua resistência à propagação de uma trinca (Ilie et al., 2017), e que também é influenciada pelas diferentes composições e microestruturas dos materiais (Badawy et al., 2016). O maior valor encontrado para o dissilicato lítio pode ser atribuído, segundo Badawy et al. (2016), a uma microestrutura altamente interligada de cristais de dissilicato de lítio. Guess et al. (2011) acrescentam ainda, que há o desenvolvimento de tensões de compressão em torno dos cristais devido à



incompatibilidade de expansão térmica entre cristais e matriz vítrea. Essas tensões são, teoricamente, responsáveis pelo aumento da resistência mecânica e da tenacidade à fratura, devido à ocorrência de deflexão das trincas. Já o valor mais baixo apresentado pela cerâmica feldspática, pode estar relacionado por ser uma cerâmica sem reforço, composta por uma fase de matriz vítrea fraca e uma ou mais fases cristalinas de forma irregular (Badawy et al., 2016), o que também explica o fato da cerâmica de matriz resinosa ter obtido valor similar de  $K_{Ic}$ , uma vez que o seu conteúdo inorgânico é a cerâmica feldspática, e de acordo com Ramos et al. (2016), a presença do polímero não melhora a tenacidade à fratura.

No estudo de Sookhakiyan et al. (2017), os valores de tenacidade à fratura obtidos para compósitos nanohíbridos diretos variaram de 1,06 a 1,54 MPa m<sup>1/2</sup>. Estes resultados foram muito discrepantes do obtido no presente trabalho para o compósito nanohíbrido indicado para CAD/CAM (2,46 MPa m<sup>1/2</sup>), provavelmente devido as melhores propriedades dos materiais indiretos para CAD/CAM (ex. maior grau de conversão de polímeros e menor número de falhas internas). O comportamento quanto a tenacidade à fratura e o módulo elástico deste material foi similar ao relatado para a dentina humana, que exibiu um valor médio de  $K_{Ic}$  de 2,3 MPa m<sup>1/2</sup> (Yan et al., 2009). O valor elevado de tenacidade à fratura pode ser reflexo da presença de polímeros, que são apresentados tipicamente por materiais não frágeis, os quais tendem a apresentar fratura com características dúcteis (Ilie et al., 2017).

Em relação à carga para fratura (N) observou-se que o compósito nanohíbrido exibiu o menor valor (2367,5 N), o que pode ser explicado pela composição deste material perante aos demais, apresentando um conteúdo total de carga inorgânica em peso de 72% a 82% (vitrocerâmicas, sílica) em uma matriz resinosa. Os demais

materiais foram semelhantes entre si, sendo que a carga para a cerâmica feldspática foi de 3242,5 N, para a cerâmica de matriz resinosa de 3200,6 N e para o dissilicato de lítio de 2881,6 N. Já na pesquisa de Albero et al. (2015), a maior carga para fratura foi obtida pelo dissilicato de lítio (440 N) e a cerâmica de matriz resinosa (250 N) apresentou valor similar a feldspática (220 N). A provável diferença nos valores obtidos se deve ao fato dos materiais do presente estudo estarem cimentados em um substrato análogo à dentina, o que melhora a distribuição de tensão aumentando a carga para fratura. Além disso, os testes foram diferentes, visto que Albero et al. (2015) obtiveram o valor da carga para fratura por meio da flexão em três pontos.

A resistência à flexão em três pontos exibida pelo dissilicato de lítio é superior à da cerâmica de matriz resinosa (Albero et al., 2015; Goujat et al., 2017; Homaei et al., 2016; Lawson et al., 2016), que por sua vez é mais elevada que a da cerâmica feldspática (Albero et al., 2015; Argyrou et al., 2016; Awada & Nathanson, 2015). No estudo de Ramos et al. (2016), onde avaliou-se a resistência inerte dos materiais, os resultados também mostraram maior resistência para o dissilicato de lítio (346,1 MPa), seguido pelas cerâmicas de matriz resinosa (159 MPa) e feldspática (116,8 MPa). Apesar de existir diferença na resistência entre estes materiais, o presente estudo mostrou que quando eles estão cimentados em um substrato análogo à dentina esta diferença não existe ao avaliarmos a carga para fratura. Isto provavelmente ocorre, pois apesar do dissilicato de lítio apresentar a maior resistência mecânica, o seu módulo elástico, 63,9 GPa (Ramos et al., 2016), é muito mais elevado do que o da dentina (16,0 a 25,0 GPa; Hairul Nizam et al., 2005; Mahoney et al., 2000), enquanto que as cerâmicas de matriz resinosa e feldspática apresentam um módulo elástico mais baixo, 34,7 GPa e 48,7 GPa, respectivamente (Ramos et al., 2016). Sendo assim, de acordo com Coldea et al. (2013) e Tay &

Pashley (2007) os materiais que exibem um módulo elástico mais próximo ao da dentina apresentam uma resposta de deformação durante a aplicação de carga mais uniforme no sistema dentina/cimento/material restaurador, o que faz com que apesar das resistências mecânicas destes materiais serem inferiores ao dissilicato de lítio, ao avaliar os materiais cimentados, não haja diferença entre eles.

A análise de Weibull do teste de carga para fratura, determinou dois parâmetros: resistência característica (carga na qual 63,21% das amostras falham) e o módulo de Weibull (confiabilidade do material). A menor resistência característica foi observada pelo compósito nanohíbrido (2552,684 N) e os demais materiais foram semelhantes estatisticamente. A interpretação do módulo de Weibull significa que quanto maior o valor de  $m$ , mais previsível o material é, ou seja, irá falhar em uma carga para a fratura próxima do valor mensurado neste teste. No presente estudo, apesar da cerâmica feldspática ter apresentado o maior valor de  $\sigma_0$ , exibiu o menor módulo (4,73), ou seja, foi o material menos previsível, portanto não se sabe ao certo o seu limite de carga. Já o maior  $m$  foi obtido pelo dissilicato de lítio (8,18), porém não houve diferença significativa entre os materiais avaliados.

Ao realizar a análise de falha das amostras submetidas ao teste de carga para fratura, observou-se que o número de fragmentos aumentou conforme o aumento da carga, este fato pode ser explicado por Quinn (2007), que relata que quanto maior a energia acumulada, ou seja maior a carga suportada antes da fratura, mais energia será liberada no momento da fratura, formando um maior número de novas superfícies (fragmentos). Apenas a cerâmica feldspática não seguiu este padrão, o que provavelmente se deve ao fato de ser o material que apresentou menor descimentação dos discos, o que pode ser observado na figura 11.

De acordo com o estudo de Roperto et al. (2016), onde foi avaliado três tipos de tratamento de superfície para avaliar a resistência de união de blocos para CAD/CAM de cerâmica (feldspática) e de compósito à dentina, os resultados mostraram que as diferentes estratégias adesivas influenciaram na resistência de união, no entanto não houve influência do tipo de material. Em contrapartida, Tekçe et al. (2018), relataram que a composição dos blocos restauradores, com diferentes matrizes orgânicas e partículas de carga inorgânica, pode ter um efeito na resistência de união, uma vez que podem reagir de diferentes maneiras durante o mesmo condicionamento de superfície. Na presente pesquisa observou-se uma grande porcentagem (90%) dos discos do compósito nanohíbrido com descimentação total após o teste de carga para fratura (figura 11), o que pode estar relacionado, segundo Tekçe et al. (2018), com a diferente composição deste material em relação às cerâmicas de matriz vítrea e resinosa, além disto, este foi o material que exibiu a menor carga para fratura e o único que teve uma amostra descimentada durante o teste de fadiga mecânica. Aparentemente, este material apresenta menor resistência mecânica e potencial adesivo do que os demais materiais avaliados neste estudo, no entanto, por ter sido lançado recentemente no mercado, ainda não há estudos que avaliaram o seu desempenho mecânico na forma monolítica e sua resistência de união.

Em relação à análise de fadiga, o parâmetro  $\beta$  indicou que não houve variação do número de falhas ao longo do tempo para nenhum dos materiais avaliados. Apenas duas fraturas catastróficas e uma descimentação ocorreram no grupo do compósito nanohíbrido e do dissilicato de lítio. Porém, se a porcentagem de amostras com trincas internas após  $1 \times 10^6$  ciclos for considerada, os materiais que sofreram maior fadiga mecânica foram as cerâmicas de matriz resinosa e de

dissilicato de lítio, onde 75% e 55% das amostras apresentaram trincas internas, respectivamente. Já a cerâmica feldspática foi o material que mostrou o melhor desempenho sob fadiga, não exibindo nenhuma fratura catastrófica e nem trincas internas. A amostra do compósito nanohíbrido descimentada após 200.000 ciclos, foi retirada do teste e ao ser analisada, possuía uma trinca interna. Não foi possível obter os limites superiores e inferiores dos valores de  $\beta$ , visto que os materiais não sofreram fadiga diante do desfecho considerado.

O módulo elástico mais próximo ao da dentina e o maior valor de tenacidade à fratura obtido pelo compósito nanohíbrido, aparentemente faz com que a distribuição de tensão seja mais uniforme no sistema material restaurador-cimento resinoso-dentina, podendo suportar melhor as cargas e conter a propagação de trincas (Coldea et al., 2013; Ramos et al., 2016), o que explicaria o bom desempenho deste material sob fadiga. Já a cerâmica de matriz resinosa, apesar de também apresentar um módulo elástico mais baixo, quando comparado as cerâmicas vítreas, apresentou um valor de  $K_{Ic}$  inferior, o que poderia justificar a grande porcentagem de amostras com trincas internas (figura 17). A grande porcentagem de trincas e a fratura apresentadas pelo dissilicato de lítio podem estar associados ao seu alto valor de dureza, o que caracteriza um material altamente frágil/friável. Já o melhor desempenho da cerâmica feldspática pode estar associado ao seu potencial adesivo maior: por possuir uma maior quantidade de fase vítrea, esse material apresentou menor porcentagem de descimentação durante teste de carga para fratura (figura 11). Uma melhor interface adesiva contribui para melhor distribuição de tensões ao longo do conjunto material restaurador-cimento resinoso-base de NG10.

As amostras geométricas, utilizadas nesta pesquisa, representam uma limitação do presente estudo, uma vez que elas não refletem a forma das restaurações clínicas, o que pode implicar em tensões diferentes durante a fadiga e carga para fratura.

O presente estudo mostrou que não houve um material que fosse o melhor em todas as propriedades avaliadas, sendo assim cada material restaurador apresentou vantagens e desvantagens. Portanto, é necessário analisar as características de cada um e associar com a situação clínica, para indicar o melhor material para cada caso.

## 7 CONCLUSÃO

Com base na metodologia empregada e na análise estatística dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O compósito nanohíbrido exibiu um valor de dureza inferior ao da cerâmica de matriz resinosa que, por sua vez, apresentou menor dureza do que os materiais cerâmicos. O maior valor foi obtido pelo dissilicato de lítio.
- O dissilicato de lítio e o compósito nanohíbrido apresentaram tenacidade à fratura superior aos demais materiais.
- A menor carga para fratura foi observada pelo compósito nanohíbrido.
- A cerâmica feldspática foi o material que mostrou o melhor desempenho no teste de fadiga mecânica, não apresentando nenhuma fratura e nem trincas internas.

## REFERÊNCIAS

1. Barão VA, Gennari-Filho H, Goiato MC, dos Santos DM, Pesqueira AA. Factors to achieve aesthetics in all-ceramic restorations. *J Craniofac Surg*. 2010;21(6):2007–12.
2. Kelly JR, Benetti P. Ceramic materials in dentistry: historical evolution and current practice. *Aust Dent J*. 2011;56(Suppl 1):84–96.
3. Coldea A, Swain M V, Thiel N. Mechanical properties of polymer-infiltrated-ceramic-network materials. *Dent Mater*. 2013;29(4):419–26.
4. Kelly JR. Ceramics in restorative and prosthetic dentistry. *Annu Rev Mater Sci*. 1997;27:443–68.
5. Wang H, Pallav P, Isgrò G, Feilzer AJ. Fracture toughness comparison of three test methods with four dental porcelains. *Dent Mater*. 2007;23(7):905–10.
6. Haselton DR, Diaz-Arnold AM, Hillis SL. Clinical assessment of high-strength all-ceramic crowns. *J Prosthet Dent*. 2000;83(4):396–401.
7. Taskonak B, Mecholsky JJJ, Anusavice KJ. Fracture surface analysis of clinically failed fixed partial dentures. *J Dent Res*. 2006;85(3):277–81.
8. Scherrer SS, Quinn JB, Quinn GD, Wiskott HW. Fractographic ceramic failure analysis using the replica technique. *Dent Mater*. 2007;23(11):1397–404.
9. Gracis S, Thompson VP, Ferencz JL, Silva NRFA, Bonfante EA. A new classification system for all-ceramic and ceramic-like restorative materials. *Int J Prosthodont*. 2015;28(3):227–35.
10. Awada A, Nathanson D. Mechanical properties of resin-ceramic CAD/CAM restorative materials. *J Prosthet Dent*. 2015;114(4):587–93.
11. Albero A, Pascual A, Camps I, Grau-Benitez M. Comparative characterization of a novel cad-cam polymer-infiltrated-ceramic-network. *J Clin Exp Dent*. 2015;7(4):e495-500.
12. Lawson NC, Bansal R, Burgess JO. Wear, strength, modulus and hardness of CAD/CAM restorative materials. *Dent Mater*. 2016;32(11):e275–83.
13. Dirxen C, Blunck U, Preissner S. Clinical performance of a new biomimetic double network material. *Open Dent J*. 2013;7:118–22.
14. Della Bona A, Corazza PH, Zhang Y. Characterization of a polymer-infiltrated ceramic-network material. *Dent Mater*. 2014;30(5):564–9.
15. Braga RR, Meira JB, Boaro LC, Xavier TA. Adhesion to tooth structure: a critical review of “macro” test methods. *Dent Mater*. 2010;26(2):e38-49.



16. Opdam N, Frankenberger R, Magne P. From “direct versus indirect” toward an integrated restorative concept in the posterior dentition. *Oper Dent*. 2016;41(S7):S27–34.
17. Tay FR, Pashley DH. Monoblocks in root canals: a hypothetical or a tangible goal. *J Endod*. 2007;33(4):391–8.
18. Ramos NC, Campos TMB, Paz IS 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.
19. Homaei E, Farhangdoost K, Tsoi JKH, Matinlinna JP, Pow EHN. Static and fatigue mechanical behavior of three dental CAD/CAM ceramics. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2016;59:304–13.
20. Hairul Nizam BR, Lim CT, Chng HK, Yap AU. Nanoindentation study of human premolars subjected to bleaching agent. *J Biomech*. 2005;38(11):2204–11.
21. Mahoney E, Holt A, Swain M, Kilpatrick N. The hardness and modulus of elasticity of primary molar teeth: an ultra-micro-indentation study. *J Dent*. 2000;28(8):589–94.
22. El Zhawi H, Kaizer MR, Chughtai A, Moraes RR, Zhang Y. Polymer infiltrated ceramic network structures for resistance to fatigue fracture and wear. *Dent Mater*. 2016;32(11):1352–61.
23. Bonfante EA, Coelho PG. A Critical Perspective on Mechanical Testing of Implants and Prostheses. *Adv Dent Res*. 2016;28(1):18–27.
24. Ankyu S, Nakamura K, Harada A, Hong G, Kanno T, Niwano Y, et al. Fatigue analysis of computer-aided design/computer-aided manufacturing resin-based composite vs. lithium disilicate glass-ceramic. *Eur J Oral Sci*. 2016;124(4):387–95.
25. Belli R, Geinzer E, Muschweck A, Petschelt A, Lohbauer U. Mechanical fatigue degradation of ceramics versus resin composites for dental restorations. *Dent Mater*. 2014;30(4):424–32.
26. Quinn GD, Giuseppetti AA, Hoffman KH. Chipping fracture resistance of dental CAD/CAM restorative materials: part I--procedures and results. *Dent Mater*. 2014;30(5):e99–111.
27. Aboushelib MN, Elsafi MH. Survival of resin infiltrated ceramics under influence of fatigue. *Dent Mater*. 2016;32(4):529–34.
28. Argyrou R, Thompson GA, Cho S-H, Berzins DW. Edge chipping resistance and flexural strength of polymer infiltrated ceramic network and resin nanoceramic restorative materials. *J Prosthet Dent*. 2016;116(3):397–403.
29. Goujat A, Abouelleil H, Colon P, Jeannin C, Pradelle N, Seux D, et al. Mechanical properties and internal fit of 4 CAD-CAM block materials. *J Prosthet Dent*. 2017; [Epub ahead of print].
30. Sonmez N, Gultekin P, Turp V, Akgungor G, Sen D, Mijiritsky E. Evaluation of

- five CAD/CAM materials by microstructural characterization and mechanical tests: a comparative in vitro study. *BMC Oral Health*. 2018;18(1):5.
31. Yi YJ, Kelly JR. Effect of occlusal contact size on interfacial stresses and failure of a bonded ceramic: FEA and monotonic loading analyses. *Dent Mater*. 2008;24(3):403–9.
  32. Kelly JR, Rungruanganunt P, Hunter B, Vailati F. Development of a clinically validated bulk failure test for ceramic crowns. *J Prosthet Dent*. 2010;104(4):228–38.
  33. Cesar PF, Della Bona A, Scherrer SS, Tholey M, van Noort R, Vichi A, et al. ADM guidance-Ceramics: Fracture toughness testing and method selection. *Dent Mater*. 2017;33(6):575–84.
  34. Strobl S, Rasche S, Krautgasser C, Sharova S, Lube T. Fracture toughness testing of small ceramic discs and plates. *J Eur Ceram Soc*. 2014;34(6):1637–42.
  35. Padipatvuthikul P, Mair LH. Comparison of shear bond strength, fatigue limit and fatigue life in resin-bonded metal to enamel bonds. *Dent Mater*. 2008;24(5):674–80.
  36. Pittayachawan P, McDonald A, Petrie A, Knowles JC. The biaxial flexural strength and fatigue property of Lava™ Y-TZP dental ceramic. *Dent Mater*. 2007;23(8):1018–29.
  37. Salazar Marocho S. Comportamento de fratura sob carga estática e cíclica das cerâmicas odontológicas quando unidas a um substrato análogo à dentina. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - São José dos Campos; 2012.
  38. Ilie N, Hilton TJ, Heintze SD, Hickel R, Watts DC, Silikas N, et al. Academy of Dental Materials guidance-Resin composites: Part I-Mechanical properties. *Dent Mater*. 2017;33(8):880–94.
  39. Badawy R, El-Mowafy O, Tam LE. Fracture toughness of chairside CAD/CAM materials - Alternative loading approach for compact tension test. *Dent Mater*. 2016;32(7):847–52.
  40. Guess PC, Schultheis S, Bonfante EA, Coelho PG, Ferencz JL, Silva NR. All-ceramic systems: laboratory and clinical performance. *Dent Clin North Am*. 2011;55(2):333–52.
  41. Sookhakiyan M, Tavana S, Azarnia Y, Bagheri R. Fracture Toughness of Nanohybrid and Hybrid Composites Stored Wet and Dry up to 60 Days. *J Dent Biomater*. 2017;4(1):341–6.
  42. Yan J, Taskonak B, Mecholsky Jr JJ. Fractography and fracture toughness of human dentin. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2009;2(5):478–84.
  43. Quinn GD. NIST recommended practice guide: Fractography of ceramics and glasses [Internet]. Washington, DC: National Institute of Standards and Technology; 2007. 960-16 p. Available from:

<http://www.ceramics.nist.gov/pubs/practice.htm>.

44. Roperto R, Akkus A, Akkus O, Lang L, Sousa-Neto MD, Teich S, et al. Effect of different adhesive strategies on microtensile bond strength of computer aided design/computer aided manufacturing blocks bonded to dentin. *Dent Res J (Isfahan)*. 2016;13(2):117–23.
45. Tekçe N, Tuncer S, Demirci M, Kara D, Baydemir C. Microtensile Bond Strength of CAD/CAM Resin Blocks to Dual-Cure Adhesive Cement: The Effect of Different Sandblasting Procedures. *J Prosthodont*. 2018; [Epub ahead of print].

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

Isabela Sandim Sousa Leite Weitzel

Taubaté, abril de 2018.