

Marcos Barbosa Pains

Influência do método experimental na resistência flexural de materiais restauradores: *ensaio mecânico, análise por elementos finitos e fractografia*

Dissertação apresentada à
Faculdade de Odontologia da
Universidade Federal de Uberlândia, para
obtenção do título de Mestre em
Odontologia Área de concentração em
Clínica Odontológica Integrada.

Uberlândia, 2011

Marcos Barbosa Pains

Influência do método experimental na resistência flexural de materiais restauradores: *ensaio mecânico, análise por elementos finitos e fractografia*

Dissertação apresentada à
Faculdade de Odontologia da
Universidade Federal de Uberlândia, para
obtenção do título de Mestre em
Odontologia, Área de concentração em
Clínica Odontológica Integrada.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Elias Campos

Banca Examinadora:
Prof. Dr. Lawrence Gonzaga Lopes
Prof. Dr. Paulo Vinícius Soares
Prof. Dr. Roberto Elias Campos

Uberlândia

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P147i Pains, Marcos Barbosa, 1982-
2011 Influência do método experimental na resistência flexural de
materiais restauradores : ensaio mecânico, análise por elementos
finitos e fractografia / Marcos Barbosa Pains. -- 2011.
72 f. : il.

Orientador: Roberto Elias Campos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Odontologia.

Inclui bibliografia.

1. Odontologia - Teses. 2. Materiais dentários - Teses. I. Campos, Roberto Elias. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Odontologia. III. Título.

CDU: 616.314




SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ODONTOLOGIA



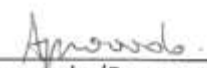
**ATA DA COMISSÃO JULGADORA DA 214ª DEFESA DE MESTRADO DA
CD MARCOS BARBOSA PAINS DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ODONTOLOGIA DESTA UNIVERSIDADE.**

Às quatorze horas do dia vinte e um de dezembro do ano de **dois mil e onze**, reuniu-se a Comissão Julgadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia, para o julgamento da Dissertação de Mestrado apresentada pelo aluno Marcos Barbosa Pains com o **título: "Influência do método de avaliação na resistência flexural de diferentes materiais restauradores : ensaio mecânico, análise por elementos finitos e fractografia."** O julgamento do trabalho foi realizado em sessão pública compreendendo a exposição, seguida de arguição pelos examinadores. Encerrada a arguição, cada examinador, em sessão secreta, exarou o seu parecer. A Comissão Julgadora, após análise do Trabalho, verificou que o mesmo encontra-se em condições de ser incorporado ao banco de Dissertações e Teses da Biblioteca desta Universidade. Acompanham este relatório os pareceres individuais dos membros da Comissão Julgadora.

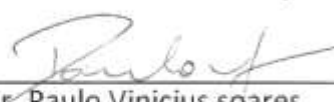
Uberlândia, 21 de dezembro 2011.



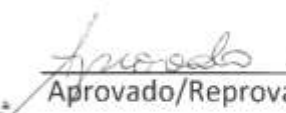
Prof. Dr. Roberto Elias Campos
Titulação: Doutor
Universidade Federal de Uberlândia – UFU




Aprovado/Reprovado



Prof. Dr. Paulo Vinicius Soares
Titulação: Doutor
Universidade Federal de Uberlândia - UFU



Aprovado/Reprovado



Prof. Dr. Lawrence Gonzaga Lopes
Titulação: Doutor
Universidade Federal de Minas Gerais-UFGO



Aprovado/Reprovado

DEDICATÓRIA

A todos aqueles de alguma forma me ajudaram, me apoiaram e por mim torceram nessa difícil jornada.

EPÍGRAFE

... Eu prefiro ser essa metamorfose ambulante

Do que ter aquela velha opinião formada sobre tudo...

Raul Seixas

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

Ao meu orientador prof. Dr. Roberto Elias Campos por ter me aceitado como orientado, pela compreensão, respeito, dedicação dispensada e exemplo de profissional que é. Tenho orgulho de ter sido seu orientado. Sou grato por ter abrido não só essa, mas várias outras portas para mim, permitido que eu conduzisse minha vida profissional paralelamente ao mestrado. Soube conduzir as pesquisas como ninguém e, com certeza, esse trabalho não teria sido acabado sem sua dedicação.

Aos meus pais, Alair e Maria, pelo amor incondicional, pelos princípios a mim repassados e pela dedicação.

A minha família e amigos pelo apoio.

A minha noiva, Roberta, pela paciência, pelo relacionamento sólido e seguro, pelo amor a mim prestado e por compreender muitas vezes a minha ausência.

Ao prof. Dr. Flávio Domingues das Neves, coordenador do Programa de Pós Graduação, e ao prof. Dr. Carlos José Soares, Coordenador do LIPO, por terem fornecido as condições necessárias a execução desse trabalho.

Ao prof. Dr. Paulo Vinícius Soares pelo empenho na concretização da análise por elementos finitos e pelos conselhos e conhecimentos repassados.

A todos os professores do Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Uberlândia, em especial aos professores Paulo Simamoto, Cássio, Murilo, Paulo César, Gisele e Veridiana.

Aos Técnico em Prótese Dentária Marco Aurélio, Takeo e Neto, os quais se dispuseram a me ajudar, mesmo em seus momentos de descanso sem visar retorno financeiro algum.

Aos colegas de mestrado Douglas Magalhães de Paula e ao Marcos Bilharinho Mendonça, os quais foram meus colegas de viagem de Patos de Minas para Uberlândia. Nos apoiamos uns nos outros em todas as fases do mestrado.

A Luciana Zaramela, também orientada pelo Prof. Dr. Roberto Elias Campos, pelos conselhos e disponibilidade.

Aos demais colegas do mestrado, em especial ao Rodrigo, Aline, Euridis e Crisnicaw, meus colegas de laboratório.

A todos os funcionários da UFU, em especial a Graça pela competência, dedicação e educação.

A Mara, funcionária da 3M ESPE, a qual efetuou a doação das resinas compostas a serem utilizadas nos ensaios.

A Secretária Municipal de Saúde de Patos de Minas, Marema de Deus Patrício, por ter permitido que eu assumisse o cargo de Coordenador de Saúde Bucal sem prejudicar o andamento do curso de mestrado.

Ao Cícero, pelos diversos momentos de entretenimento proporcionados.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
3. PROPOSIÇÃO	25
4. MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 Obtenção das amostras para os ensaios flexurais de três e de quatro pontos:	28
4.1.1 Resina composta	28
4.1.2 Cerômero	30
4.1.3 Cerâmica feldspática	31
4.1.4 Cerâmica Reforçada	32
4.2 Obtenção das amostras para ensaio de flexão biaxial:	33
4.2.1 Resina composta	33
4.2.2 Cerômero	33
4.2.3 Cerâmica feldspática	34
4.2.4 Cerâmica Reforçada	34
4.3 Padronização superficial, armazenamento e medição das amostras	34
4.4 Ensaios mecânicos:	35
4.4.1 Ensaio flexural de três pontos	35
4.4.2 Ensaio flexural de quatro pontos	37
4.4.3 Ensaio flexural Biaxial	38
4.5 Análise por elementos finitos	41
4.6 Análise macroscópica das fraturas	42
5. RESULTADOS	43
6. DISCUSSÃO	51
7. CONCLUSÃO	57
REREFÊNCIAS	58

RESUMO

Além das diferenças na composição química, que tem influência direta nas propriedades mecânicas dos materiais restauradores, os diversos métodos de avaliação têm gerado diferentes resultados que dificultam qualquer comparação entre as propriedades dos materiais. O objetivo desse trabalho foi determinar e comparar a resistência flexural (RF) de quatro materiais restauradores e a influência do método na mensuração. Foram obtidos 12 grupos (n=15) sendo que cada material (Filtek Z350, Epricord, Super Porcelain EX-3, e IPS Empress 2) foi submetido a três ensaios de avaliação da RF. Para os ensaios de três e quatro pontos foram obtidas amostras em forma de barras retangulares (25x2x2 mm) e para o biaxial, amostras em forma de disco (12x1,2 mm). Os ensaios foram realizados em máquina EMIC à velocidade de 1 mm/min, a análise da distribuição de tensões foi realizada por elementos finitos em 3D e o local da fratura foi visualmente avaliado. Os valores médios de RF foram obtidos a partir da carga de fratura das amostras e submetidos à análise estatística. Two way ANOVA e teste de Tukey indicaram diferenças significativas entre os materiais com maiores valores para o IPS Empress 2 (a), seguido da resina Filtek Z350 (b) em todos os métodos, seguidos de Super Porcelain EX-3 (c) e Epricord (d) em dois dos três ensaios. Os ensaios de três pontos e biaxial apresentaram valores significativamente maiores (A), enquanto que o de quatro pontos apresentou resultados inferiores (B). Os padrões de fratura observados estão correlacionados com a análise de elementos finitos. Os resultados indicaram confiabilidade de todos os métodos, suportada pelos coeficientes de variação razoavelmente baixos e pelos maiores valores dos materiais mais reforçados em sua composição. Porém, devido a menor sensibilidade, menor reprodutibilidade (maior coeficiente de variação) e maior dificuldade de execução, o ensaio flexural de quatro pontos parece ser o menor indicado.

ABSTRACT

Besides the differences in chemical composition, which has a direct influence on the mechanical properties of restorative materials, the various methods of evaluation have generated different results that make it difficult any comparison among their properties. The aim of this study was to determine and compare the flexural strength (FS) of four restorative materials and the influence of the measurement method in such property. Twelve groups (n=15) were obtained and each tested material (Filtek Z350, Epricord, Super Porcelain EX-3 and IPS Empress 2) was submitted to three mechanical tests to assess their FS. For three and four-point bending tests rectangular beams (25x2x2 mm) was used and disc-shaped (12x1,2 mm) was used in the biaxial test. Specimens were submitted to load at the 1 mm/min speed in an EMIC machine, the analysis of stress distribution was performed by 3D finite element analysis and fracture site was visually evaluated. Mean values of FS were obtained from the fracture load of the samples and subjected to statistical analysis. Two-way ANOVA and Tukey's test indicated significant differences between the materials with higher values for IPS Empress 2 (a), followed by Filtek Z350 (b) in all methods, followed by Super Porcelain EX-3 (c) and Epricord (d) in two of three tests. Three-point bending and biaxial tests showed significantly higher values (A), while the four-point bending test was inferior (B). Fracture modes observed correlated with the finite element analysis. Results indicated reliability of all methods, supported by reasonably low coefficients of variation and the highest values of the materials further strengthened in its composition. However, due to lower sensitivity, lower reproducibility (higher coefficient of variation) and greater difficulty of implementation, the four-point bending test seems to be less suitable.

INTRODUÇÃO:

Devido à crescente busca por restaurações sem metal, a evolução na composição e propriedades das resinas compostas (Klapdohr & Moszner, 2005) e das cerâmicas (Della Bona et al., 2004) permitem sua utilização em áreas de altas cargas oclusais. Porém, estudos longitudinais têm mostrado que uma das principais causas de falhas de restaurações não metálicas são as fraturas (van Nieuwenhuysen et al., 2003; Della Bona et al., 2004; da Rosa Rodolpho et al., 2006). A resistência flexural, definida como a resistência máxima ao dobramento de um material antes que ocorra a falha, é importante indicador da resistência dos materiais restauradores. A relevância clínica dessa propriedade se faz presente quando, no ato da mastigação, incidem diferentes forças no dente e na restauração (Dauvillier et al., 2000). Quando um material é aplicado em locais onde há alta incidência de forças mastigatórias, alta resistência flexural é requerida.

A resistência flexural pode ser mensurada por ensaio de três pontos, de quatro pontos ou um ensaio biaxial, onde uma carga estática é aplicada até a fratura. As normas ISO 4049 (2000) e ISO 6872 (2008) recomendam etapas padronizadas de obtenção das amostras e execução dos ensaios de resistência flexural, objetivando melhor reprodutibilidade e uniformidade dos resultados. Embora os testes *in vitro* sejam reconhecidamente limitados, por não reproduzirem as condições clínicas, constituem o primeiro passo para prever o desempenho clínico de materiais dentários (Yilmaz et al., 2007) e devem incluir um método capaz de acessar sua resistência (Pick et al., 2010). Os ensaios de resistência à flexão são considerados sensíveis a imperfeições superficiais, tais como fissuras, vazios e falhas relacionados que podem influenciar a resistência à fratura de materiais frágeis (Combe et al. 1999; Rodrigues et al. 2008). Altos valores de resistência à flexão refletem uma tendência limitada à fissuração e alta resistência a defeitos de superfície e erosão (Combe et al. 1999).

Embora iguais no objetivo, resultados diferentes entre os métodos têm sido observados para um mesmo material. Tais diferenças estão

relacionadas a parâmetros inerentes a cada método de avaliação (Suansuwam & Swain, 2001; Lohbauer et al., 2003; Guazatto et al., 2004; Jin et al., 2004; Fischer et al., 2008; Yilmaz et al., 2010; Pick et al., 2010), com as amostras na sua forma de obtenção (Ban & Anusavice, 1990), suas dimensões, geometria e orientação (Palin et al., 2003; Jin et al. 2004) e na concentração de tensões (Hammant, 1971; Abu-Hassan et al., 1998; Wen et al., 1999; Fischer et al., 2008). Dessa forma, parece não haver consenso sobre qual ensaio é mais indicado para investigação da resistência flexural dos materiais restauradores (Shetty et al., 1983; Palin et al., 2003; Chung et al., 2004; Jin et al., 2004; Fischer et al., 2008; Pick et al., 2010) e comparações dos resultados dos diferentes estudos são muito difíceis. Em geral, parece ser consenso que, quanto maior a área sobre tensão, menor seria a resistência flexural, por envolver mais variáveis de onde se iniciaria a propagação da fratura (Ban & Anusavice, 1990; Yap & Teoh, 2003; Chung et al., 2004; Anusavice et al., 2007; Fischer et al., 2008; Rodrigues et al., 2008; Pick et al., 2010).

Com relação às falhas, nos ensaios biaxiais, elas ocorrem em diversos ângulos, enquanto que nos de três e de quatro pontos são perpendiculares ao longo eixo da amostra (Wen et al., 1999). O momento da força aplicada tem papel importante na localização da falha (DeHoff et al, 1982).

Embora os ensaios disponíveis para avaliação da resistência flexural sejam amplamente aceitos e utilizados, os resultados na literatura são diferentes e controversos, dificultando a comparação das propriedades mecânicas dos materiais restauradores. As hipóteses nulas de que a resistência flexural não é influenciada pelo método de avaliação e pela composição dos materiais devem ser consideradas.

2. REVISÃO DA LITERATURA:

Em 1982, DeHoff et al. aplicaram o ensaio flexural de quatro pontos para verificação da resistência a adesão de coroas metalo-cerâmicas e realizaram análise por elementos finitos. A análise por elementos finitos já havia mostrado que os ensaios de flexão de quatro pontos tinham um elevado potencial para induzir falha de tração na camada de cerâmica em uma linha de aplicação de força, mas não havia uma verificação experimental crítica. Apesar de o fracasso da amostra nem sempre ocorrer sob a linha de aplicação da força, pela seleção da geometria adequada, tal falha pôde ser garantida. Os principais fatores que ditaram a localização de falhas foram à razão da espessura de cerâmica-metal e a distância da carga para os suportes fixos (braço de momento). Os autores concluíram que: 1. a configuração da amostra do ensaio de flexão de quatro pontos determina a localização da falha. Quando a relação cerâmica-metal é diminuída, o local da fratura mudará de baixo da linha de aplicação de força para a superfície da cerâmica entre as linhas de aplicação de força; 2. Quando a falha ocorre em uma região em uma linha de aplicação de força, o local exato da fratura e tipo de iniciação da fratura é difícil de determinar; 3. A análise de elementos finitos fornece uma abordagem útil para interpretar magnitude de tensão e distribuição na falha. 4. Devido à complexidade da distribuição de tensões diretamente abaixo de uma linha de aplicação de força, o ensaio de flexão de quatro pontos pode dar informações incorretas sobre os efeitos das variáveis experimentais em caso de falha na interface da metalo-cerâmica.

Em 1984, Kusy & Dilley utilizaram os ensaios flexurais de três e de quatro pontos para determinar o modulo de elasticidade de fios ortodônticos. Em sua discussão, os autores citando Hammant (1971), enumeraram três vantagens do ensaio de quatro pontos em relação ao de três pontos: há flexão pura entre os suportes internos, não havendo componentes de cisalhamento nessa região; devido ao estresse e tensão uniformes existente ao longo da superfície do espécime, não há concentração de estresse perto dos pontos de carga; com a maior parte da amostra em tensão uniforme, os resultados são

mais representativos das propriedades do material. Apesar dessas potenciais vantagens, as variâncias médias dos ensaios de quatro pontos foram maiores que aqueles apresentados pelo de três pontos no estudo.

Devido ao fato de haver diversos métodos para condução de ensaios flexurais e nenhum deles ter se mostrado o mais apropriado, Chitchumnong et al. (1989) compararam os ensaios flexurais de três e de quatro pontos com quatro diferentes polímeros. Os valores de resistência à flexão do ensaio de flexão de três pontos foram sempre maiores, sugerindo que esse parâmetro é dependente do tipo de teste empregado.

Um ensaio de flexão biaxial (disco apoiado sobre três esferas com um ponto de carga), um ensaio de flexão de quatro pontos e um ensaio de tração diametral foram usados por Ban & Anusavice (1990) para medir a tensão de ruptura de quatro materiais dentários frágeis: cimento fosfato de zinco, cerâmica de corpo, cerâmica opaca, e resina composta fotopolimerizável. Além disso, a probabilidade de fratura dos espécimes do ensaio biaxial foi prevista a partir dos resultados do ensaio de flexão de quatro pontos, com o uso da teoria da fratura estatística. Os valores de resistência flexural de quatro pontos do cimento de fosfato de zinco e de cerâmica opaca foram significativamente menores ($p < 0,05$) do que os correspondentes valores médios do ensaio biaxial, enquanto que a média de resistência a flexão de quatro pontos para cerâmica de corpo e resina composta corpo foram semelhantes ($p > 0,05$) aos correspondentes valores médios de resistência biaxial. As médias de resistência a flexão biaxial do cimento de fosfato de zinco e cerâmica opaca foram muito mais elevadas do que os valores teóricos previstos a partir da teoria da falha de superfície, enquanto os valores de resistência de cerâmica e corpo de resina composta foram comparáveis com aqueles determinados a partir do ensaio de flexão de quatro pontos. Estes resultados demonstram que a força de cimento de fosfato de zinco depende, não apenas dos fatores geométricos, mas também das condições de preparação da amostra. Além disso, sintetizaram os autores que o ensaio biaxial é mais simples de se executar e fornece uma melhor simulação de tamanho de amostra clinicamente relevante do que o utilizado para outros

ensaios de força, pois o tamanho da amostra e os procedimentos de preparação são mais semelhantes às condições clínicas para esse teste.

Em 1999, Combe et al. realizaram trabalho para medir propriedades mecânicas de um grupo diversificado de materiais utilizados para confecção de núcleos de preenchimento diretos (amálgama com alta quantidade de cobre, um cermet, uma resina composta VLC e dois compósitos desenvolvidos especificamente para esta aplicação). A resistência flexural de cada material foi testada em função de tempo usando amostras em forma de palito com dimensões de 25x2x2 mm. Os espécimes foram armazenados a 37° C antes do ensaio e os testes feitos em 1h, 24 h, um e três meses após confecção. Todos os materiais atenderam as especificações mínimas para esse tipo de aplicação, exceto em termos de resistência à flexão para o amálgama após 1 h e cermet em todos os intervalos de tempo. Além disso, para os autores, ensaios de resistência à flexão são considerados sensíveis a imperfeições superficiais, tais como fissuras, vazios e falhas relacionados que podem influenciar a resistência à fratura de materiais frágeis. Altos valores de resistência à flexão refletem uma tendência limitada à fissuração e alta resistência a defeitos de superfície e erosão.

Fleming et al. (2000) investigaram a influência da mistura de pó e líquido utilizado na fabricação de espécimes em forma de disco de cerâmica de corpo para análises laboratoriais. Utilizaram a cerâmica de dentina Vitadur-Alpha para fabricação dos discos e verificaram a resistência à fratura. Trinta espécimes foram preparados com diferentes conteúdos de pó e de líquido e submetidos ao teste flexural biaxial. Os resultados mostraram que o aumento ou diminuição do conteúdo de pó da suspensão resulta em aumento na porosidade e diminuição na densidade aparente do sólido. Os autores concluíram que não há diminuição significativa na resistência à flexão biaxial ou na confiabilidade dos dados obtidos para resistência à fratura para as consistências de lama investigadas. No entanto, os resultados sugerem que existe uma consistência ideal, onde os melhores resultados de reprodutibilidade para o ensaio foram alcançados. Uma comparação entre os materiais só pode ser alcançado se a preparação de amostras ocorre de forma

consistente entre os centros de ensaio e, portanto, esses resultados parecem ter implicações para os laboratórios de ensaios de materiais.

Para investigar a confiança do ensaio flexural biaxial e do ensaio flexural de três pontos, Palin et al (2003), testaram um compósito experimental de baixa contração baseado em oxirano (EXL596) e 2 compósitos convencionais baseados em metacrilato (Z100 e Z250). As amostras foram testadas 24 horas após imersão em banho aquoso a $37 \pm 1^\circ\text{C}$ protegido da luz, e os resultados foram avaliados e associados ao módulo de Weibull (m). As médias de resistência flexural biaxial associadas ao m foram: EXL596 - $168 \pm 11\text{Mpa}$ ($m = 16.2 \pm 4$); Z250 - $140 \pm 12\text{Mpa}$ ($m = 11.9 \pm 3$); Z100 - $126 \pm 11\text{Mpa}$ ($m = 10.2 \pm 2$). As médias de resistência flexural de três pontos associadas ao m foram: EXL596 - $113 \pm 15\text{MPa}$ ($m = 9,2 \pm 2$); Z250 - $92 \pm 10\text{MPa}$ ($m = 8,5 \pm 2$); Z100 - $79 \pm 16\text{MPa}$ ($m = 6,3 \pm 1$). Como conclusão, os autores sugeriram que, para as resinas compostas, o ensaio de resistência flexural biaxial fornece resultados mais confiáveis que o ensaio de três pontos. Além disso, a geometria em forma de disco da amostra usada no ensaio de flexão biaxial permite a cura completa e controlada de cada amostra, levando a um aumento significativo na resistência à flexão e confiabilidade experimental. O estudo sugeriu que a utilização do ensaio biaxial para testar resistência à flexão de compósitos dentários pode diminuir a variabilidade dos dados entre os diferentes centros de ensaio de resistência.

Yap & Teoh (2003) estudaram as propriedades flexurais (resistência à flexão e módulo de flexão) de quatro compósitos restauradores (Silux Plus, Z100, Ariston e Surefil) usando os ensaios flexural de três pontos recomendado pela ISO 4049 (IFT) e um ensaio mini-flexural (MFT) de três pontos. A diferença entre os ensaios foi no comprimento dos espécimes [$25 \times 2 \times 2\text{ mm}$ (IFT) e $12 \times 2 \times 2\text{ mm}$ (MFT)] e a distância entre os suportes [20 mm (IFT) e 10 mm (MFT)]. Seis amostras para cada material foram obtidas de acordo com as recomendações dos fabricantes. Depois de polimerizados, os espécimes foram armazenados em água destilada a 37°C por 24 h. Os espécimes foram subsequentemente secos com papel absorvente, medidos e submetidos a ensaios de flexão usando uma máquina universal de ensaios Instron com uma

velocidade de 0.75 min/mm. Para ambos os ensaios, os resultados das análises estatísticas de resistência à flexão foram idênticos. Silux apresentou significativamente menor resistência à flexão em comparação com os outros compostos e a resistência à flexão de Ariston foi significativamente menor do que Z100 e Surefil. Para IFT, o módulo de flexão da Z100 foi significativamente maior que Silux, Ariston e Surefil enquanto para MFT, Silux apresentou módulo significativamente menor em comparação com Z100, Ariston e Surefil. Uma correlação significativa, forte e positiva foi observada para resistência à flexão entre IFT e MFT. A correlação para módulo de flexão também foi significativa e positiva, mas foi mais fraca. Segundo os autores, como o ensaio mini flexural (MFT) tem a vantagem de facilidade de fabricação de amostra e é mais realista clinicamente, ele é sugerido para o ensaio de compósitos restauradores.

Lohbauer et al. (2003) avaliaram as propriedades mecânicas de resinas compostas restauradoras odontológicas sob carregamento quase-estático e cíclico. Para tanto, 10 barras (25x2x2 mm) de diferentes resinas compostas foram fabricadas de acordo com a norma ISO 4049, armazenados por duas semanas em água destilada e submetidos ao ensaio flexural de quatro pontos em uma máquina universal de ensaios. Os limites de fadiga flexural (FFL) para 10⁵ ciclos foram determinados sob carregamento equivalente. Todas as amostras foram testadas e fatigadas em água a 37° C. Foi realizada análise fractográfica utilizando-se MEV. Os valores de resistência à flexão inicial para os materiais de resina composta variou de 55,4 MPa para Solitaire até 105,2 MPa para Filtek Z250. A média limite de fadiga flexural de 10⁵ ciclos variou entre 37 e 67% da força inicial. MEV das superfícies fraturadas sugere dois tipos de mecanismos de fratura inicial e após fadiga. Para os autores, isso significa que o comportamento de fadiga de materiais de resina composta não se correlaciona com os valores de força inicial. Materiais que fornecem alta força inicial, obviamente, não possuem a melhor resistência à fadiga. Os autores concluem que a medição de fadiga à flexão de materiais de resina composta deve ser visto como uma ferramenta útil para avaliar as propriedades mecânicas a longo prazo.

Em 2003, Schalch comparou resistência flexural, dureza e

resistência a tração diametral do material de infra estrutura dos sistemas cerâmicos In-Ceram Zirconia/Vita (óxidos de alumínio e zircônio, processados por dupla sinterização) e IPS-Empress 2/Ivoclar (dissilicato de lítio, processado por injeção). O ensaio de flexão realizado foi o de três pontos, com amostras em forma de barra de 25 mm x 5 mm x 2 mm, de acordo com a norma ISO 6872. Os ensaios foram realizados em equipamento MTS 810 (Material Test System - EUA), com célula de carga de 10kN e velocidade de 0,5mm/min, gerenciado pelo programa Test Star II (IBM, EUA). Os resultados mostraram resistência à flexão do material In-Ceram Zirconia de 439,88MPa e do IPS-Empress 2 de 226,13MPa. Entretanto, observou-se maior resistência à tração diametral do IPS-Empress 2 (175,08MPa) em relação ao In-Ceram Zirconia (150,47MPa). Para a dureza Vickers, o material In-Ceram Zirconia (972,0VHN) também mostrou-se superior em relação ao IPS-Empress 2 (488,33VHN).

A proposta do estudo de Jin et al. (2004) foi avaliar a relação entre a resistência flexural de cerâmicas dentárias usando os ensaios flexurais de três e de quatro pontos, e biaxial. Três marcas de cerâmica para revestimento (d-ESIGN, Super porcelain AAA, Vintage Hallo), duas cerâmicas injetáveis (IPS Empress 2 e OPC 3G) e uma cerâmica feldspática (Crys-Cera) foram usadas. Vinte espécimes em forma de barra e 10 em forma de disco de cada cerâmica foram preparadas de acordo com as instruções do fabricante, polidas e submetidas aos ensaios mecânicos. Três resistências flexurais de cada material foram comparadas utilizando-se one-way ANOVA e comparação de Tukey e também investigadas pela análise de Weibull. Exceto para as cerâmicas OCP 3G e Crys-Cera, a resistência flexural biaxial e de três pontos para as outras foram significativamente maiores que a resistência flexural de quatro pontos correspondente. Como conclusão, os autores observaram que a resistência flexural das cerâmicas dentais é afetada pela forma e tamanho dos espécimes e pelas condições do ensaio. A resistência flexural nos três métodos de ensaio com as quatro cerâmicas nesse estudo variou da seguinte forma: flexural de três pontos > biaxial > flexural de quatro pontos, enquanto que a resistência para 2 outras cerâmicas variou da seguinte forma: biaxial > três pontos > quatro pontos. Entretanto, de acordo com a previsão de resultados

feita através de cálculos matemáticos a ordem de resistência seria biaxial > três pontos > quatro pontos. Segundo os autores, essa diferença pode ser explicada pelas condições de sinterização da cerâmica de revestimento e pelas características anisotrópicas das cerâmicas injetáveis.

Chung et al. (2004), compararam 2 métodos de ensaio para verificar resistência flexural de resinas compostas. Os ensaios utilizados foram os testes flexural de três pontos e o biaxial. Os materiais utilizados foram os compósitos microfill (A110), minifill (Z100 and Filtek Z250), poliácido modificado (F2000), e uma resina flow (Filtek Flowable-FF). A resistência flexural foi determinada pelo uso dos ensaios após uma semana de armazenamento em água a 37°C. A média de resistência flexural variou de 66.61 até 147.21 e 67.27 a 182.81 Mpa para o teste de três pontos e para o biaxial de esfera em três esferas, respectivamente. Em ambos os métodos de ensaio, Z100 foi mais resistente que todos os outros compósitos testados. No teste de três pontos, a resistência flexural da resina Z250 foi significativamente maior que A110, F2000 e FF. FF foi significativamente mais resistente que A110 e F2000. O ensaio biaxial obteve as mesmas conclusões, exceto pela semelhança estatística entre Z250 e FF. Como conclusão, os autores afirmaram que o teste biaxial utiliza espécimes de tamanho mais apropriado em relação do de três pontos. Entretanto, devido ao estresse de contato ser complexo, a reprodutibilidade do ensaio biaxial não é boa (coeficiente de variação > 10%). Assim, concluiu-se que o ensaio biaxial não é mais confiável que o ensaio flexural de três pontos padronizado pela ISO na avaliação de materiais dentários frágeis.

O estudo de Guazzato et al. (2004), teve como objetivo comparar a resistência flexural, tenacidade à fratura e microestrutura de uma gama de materiais de cerâmica pura. Foram avaliadas três cerâmicas prensadas a quente (IPS-Empress, IPS Empress 2, uma nova cerâmica experimental) e 1 cerâmica alumina infiltrada por vidro (In-Ceram Alumina) processada tanto por pressão a seco quanto por colagem. A resistência flexural foi avaliada com o método de três pontos com 10 espécimes em forma de barra (20 x 4 x 1,2 mm) para cada grupo. A tenacidade à fratura foi mensurada a partir de 20 amostras (20 x 4 x 2 mm) utilizando a técnica recuo de força. A fração de volume de cada

fase, as dimensões e formas dos grãos, porosidade e os padrões de fraturas foram investigados utilizando MEV. Como resultado, o valor médio em MPa para resistência flexural, tenacidade a fratura em MPa m^{1/2} foram, respectivamente: IPS-Empress 106, 1,2; IPS Empress 2 306, 2,9; cerâmica experimental 303, 3,0; In-Ceram Alumina prensada a seco 440, 3,6; In-Ceram Alumina por colagem 594, 4,4. A microscopia revelou a relação entre a matriz vítrea e a fase cristalina e as características desta última foram correlacionadas com os mecanismos de fortalecimento e endurecimento dessas cerâmicas. Os autores concluíram que um aumento do teor cristalino de uma vidro - cerâmica é acompanhada por um aumento da resistência e da tenacidade à fratura. No entanto, em materiais com conteúdos cristalinos comparáveis, alguns outros fatores, tais como a porosidade, o tamanho do grão, forma e orientação são importantes na determinação das propriedades mecânicas. No caso da cerâmica contendo dissilicato de lítio, a diferença média no comprimento de grãos não tem nenhum efeito mensurável sobre a resistência e a tenacidade à fratura. Por outro lado, as variações mínimas do tamanho de grão, forma e orientação no vidro infiltrado por alumina reforçada com cerâmica, afeta fortemente a resistência e a tenacidade à fratura de duas cerâmicas de outra forma similar. Do ponto de vista clínico, o alinhamento de grãos alongados paralelamente à superfície é preferido em relação à disposição perpendicular ou alinhamento aleatório, visando-se uma maior resistência à propagação de trincas através do material.

Em 2005, Franco avaliou a resistência a flexão, microdureza e grau de conversão de 9 resinas indiretas e de uma direta em função da cor: esmalte, dentina e translúcida. Os materiais utilizados foram Solidex, Epricord, Belleglass, Signum, Sinfony, Tescera, Cristobal, Targis, Adoro (indiretas) e Esthet X (direta). O método para teste de resistência flexural foi o de três pontos de acordo com a norma ISO 4049 com n=15. A partir dos resultados obtidos, a autora chegou às seguintes conclusões: em relação a resistência flexural, o ranqueamento variou em função da cor e as resinas Cristobal, Sinfony, Belleglass e Targis tiveram valores de resistência flexural superiores aos demais materiais. Os piores valores foram das resinas Epricord, Signun e

Solidex. A cor não mostrou diferenças significantes, mas a interação e o material mostraram.

Oliva (2006) avaliou o comportamento mecânico de cerâmicas feldspáticas (Duceram Plus, Excelsior, Duceragold, Symbio, VMK, Omega 900 e Vitadur Alpha) submetidas a dois diferentes métodos de processamento laboratorial: sinterização convencional (indicado pelo fabricante) e por injeção a vácuo (experimental). Na avaliação o autor realizou ensaio de flexão de três pontos e de dureza. Foram confeccionadas 10 amostras em forma de barra de acordo com a norma ISO 6872. Os resultados indicaram que o processo experimental, de injeção a vácuo, não alterou a dureza dos materiais. Além disso, as cerâmicas Duceram Plus, Excelsior, Omega 900, Symbio e VMK 95 apresentaram maior resistência a flexão se processadas por injeção. Já os materiais Vitadur Alpha e Ducera Gold não sofreram influência do método de processamento.

Em 2007, Yilmaz et al. avaliaram e compararam a resistência flexural e a tenacidade a fratura de materiais cerâmicos utilizando-se o ensaio de resistência flexural biaxial (ISO 6872) e o ensaio de indentação para tenacidade a fratura. Os espécimes foram confeccionados em seis diferentes materiais cerâmicos (Finesse, Cergo, IPS Empress, In-Ceran Alumina, In-Ceran Zirconia e Cercon Zirconia) com diâmetro de 15mm e espessura de 1,2mm. Para cada grupo (n=15), foram comparadas a resistência flexural biaxial, o módulo Weibull e tenacidade a fratura por indentação. O ensaio flexural biaxial mostrou diferenças significativas entre os materiais testados, sendo que o material Cercon Zirconia apresentou os maiores valores quando comparado com os demais materiais estudados. Além disso, os autores enfatizaram que uma das limitações do estudo é o fato de ser um teste *in vitro* e não considerar a fadiga sofrida pelo material na cavidade oral.

Jorge (2007) estudou a rugosidade média de superfície e a resistência flexural a cerâmica IPS Empress 2 submetida a 6 diferentes tipos de tratamento superficial. Para o ensaio flexural de três pontos foram fabricados 150 espécimes de cerâmica com dimensões de 25 x 5 x 2 mm e divididos em 6 grupos (n=25): polido sem tratamento adicional, polido mais tratamento com

ácido fluorídrico 10% por 20 segundos, polido mais jateamento com óxido de alumínio com partículas de 50 μm , não polido sem tratamento adicional, não polido mais tratamento com ácido fluorídrico 10% por 20 segundos, não polido mais jateamento com óxido de alumínio com partículas de 50 μm . Segundo o autor, o grupo polido mostrou maior resistência à flexão e menor rugosidade em relação ao grupo não polido. Para resistência flexural, tanto para o grupo polido quanto para o grupo não polido, os grupos não diferiram significativamente entre si. Para rugosidade média superficial, o grupo polido diferiu do polido tratado com ácido e do polido tratado com jateamento e esses dois últimos não diferiram significativamente. O grupo não polido diferiu significativamente do não polido tratado com jateamento e diferiu do tratado com ácido. Diante dos resultados, o autor concluiu que o quanto maior a rugosidade superficial, menor a resistência flexural. O ácido fluorídrico diminuiu a rugosidade da cerâmica não polida e o jateamento e o condicionamento ácido aumentaram a rugosidade da cerâmica polida.

Rodrigues et al. (2008) estudaram a resistência flexural e o módulo de Weibull de um compósito microhíbrido e de um nanohíbrido através dos ensaios de flexão de três e de quatro pontos. Para a realização do trabalho, 30 espécimes da resina Filtek Z250 e 30 amostras da resina Filtek Supreme foram confeccionadas de acordo com a norma ISO 4049 (2000). Depois de armazenadas por 24 horas em água destilada a 37° C os espécimes foram submetidos aos ensaios mecânicos utilizando-se uma máquina universal de ensaios (EMIC) a uma velocidade de 1mm/min. Os dados de resistência flexural foram obtidos e submetidos aos testes estatísticos de t-Student ($\alpha=0,05$) e Weibull. As superfícies foram analisadas baseadas nos princípios de fractografia. Os resultados indicaram que os dois compósitos apresentaram resistência equivalente dentro do mesmo teste. Entretanto, os resultados obtidos com o ensaio de três pontos foram estatisticamente superiores. Defeitos críticos foram mais frequentemente associados com a superfície do espécime (acima de 90%) e foram caracterizados como arranhões/sulcos, distribuição não uniforme de fases, inclusões e bolhas. Os autores concluíram que a resistência flexural de três pontos é maior que a de quatro pontos devido

a menor área contendo falhas envolvida no primeiro. Além disso, apesar da grande diferença no tamanho das partículas entre os compósitos, a fração de volume de carga é semelhante entre eles, o que provavelmente foi a razão para os valores médios semelhantes de resistência a flexão e comportamento de fratura.

Izumida et al., em 2008, avaliaram as propriedades mecânicas de novas resinas rígidas e compararam com os resultados com outras resinas previamente investigadas. Foram utilizadas duas novas resinas rígidas para dentina e para esmalte (Epicord: EP, Kuraray, Co., Ltd., Osaka, Japão - Proximo: PR, GC, Co., Ltd., Tóquio, Japão). Em relação às características fundamentais, o coeficiente de expansão / retração térmica, o conteúdo de carga, a contração de polimerização e o desgaste foram examinados. Em relação à força da resina, a resistência à flexão, dureza, resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à fratura de uma coroa de jaqueta foram medidos. O ensaio de flexão realizado foi o de três pontos, usando amostras de 20x1x8 mm. Após obtenção, as amostras foram mecanicamente polidas e carregadas em uma máquina de ensaios universal à velocidade de 1.0mm/min, com distância entre os apoios de 13.5mm. Foram utilizados 5 espécimes de cada resina. Como resultado, observou-se que as resinas testadas nesse estudo mostraram comparativamente valores mais baixos do que outras resinas indiretas, testadas por outros trabalhos (Estenia – Kuraray Co. Japan; Art glass - Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, Germany; Eye sight - Kanebo, Japan, Gradia - GC, Co., Ltd. e Cesead II - Kuraray, Co., Ltd. por exemplo), em relação à resistência à flexão, dureza, resistência à compressão e resistência à fratura da coroa de jaqueta. As taxas de conteúdo total de carga e quantidade de desgaste dessas resinas apresentaram valores semelhantes aos dessas outras resinas utilizadas para comparação. O coeficiente de dilatação / retração das resinas do presente estudo, apresentaram valores superiores aos das outras resinas investigadas por outros autores. EP mostrou uma tendência diferente do PR sobre a resistência à compressão, módulo de elasticidade e contração de polimerização. Especificamente em relação ao ensaio de flexão, os valores médios para a

resina Epricord de esmalte foram 80,4MPa e para Epricord de dentina foram 74.1MPa. Em conclusão, PR e PE não mostraram propriedades físicas dramaticamente melhores. No entanto, os resultados de cada exame neste estudo, segundo os autores, podem ser aceitáveis clinicamente.

Gonzaga et al. (2008) avaliaram a resistência à flexão biaxial, dureza Vickers, tenacidade à fratura, módulo de Young, coeficiente de Poisson e porosidade de duas cerâmicas, IPS Empress (E1) e IPS Empress 2 (E2), em função da temperatura de prensagem. Dez discos foram prensados a 1065, 1070, 1075 e 1080° C para o E1, e em 910, 915, 920 e 925 ° C para E2. A resistência flexural biaxial foi determinada utilizando o método pistão-em-três-esferas. Para amostras E1 tratadas em diferentes temperaturas, não houve diferença estatística entre os valores de todas as propriedades avaliadas. Para amostras E2 tratadas em diferentes temperaturas, não houve diferença estatística entre os valores de resistência flexural, módulo de Young, e coeficiente de Poisson. No entanto, dureza Vickers e tenacidade à fratura foram significativamente maiores para 910 e 915 ° C, respectivamente. Sobre porosidade, o valor médio obtido para E2 para 925 ° C foi significativamente maior em comparação com outras temperaturas.

Em 2008, Fischer et al. realizaram um estudo onde a resistência flexural de revestimentos cerâmicos de zircônia foram comparados. Para realização do estudo, foram utilizados 10 diferentes tipos de revestimento cerâmico de zircônia (grupo teste) e três diferentes revestimentos cerâmicos para a técnica metalo-cerâmica (grupo controle). A resistência flexural dos materiais foi realizada utilizando-se o ensaio de resistência flexural de três pontos e biaxial, de acordo com a norma ISO 6872:1995, bem como o ensaio de quatro pontos de acordo com a norma EN 843-1:2005 (n=10). A resistência flexural para o ensaio de três pontos variou entre 77.8 ± 8.7 e $106.6 \pm 12,5$ Mpa sem nenhuma diferença estatisticamente significante. No ensaio biaxial variou entre 59.5 ± 6.2 e 89.2 ± 9.5 Mpa com 5 grupos homogêneos. O grupo controle mostrou valores para o ensaio flexural de três pontos variando de 93.4 ± 10.0 a 141.2 ± 11.6 Mpa, e para o ensaio flexural de quatro pontos valores de $82.7 \pm$ a 116.9 ± 9.8 Mpa. Em todos os casos, os resultados do ensaio

flexural de quatro pontos foram significativamente inferiores aos obtidos no ensaio flexural de três pontos. A resistência flexural de três pontos do grupo teste foi similar à do grupo controle. Como conclusão foi observado que os valores da resistência flexural de quatro pontos para todos os materiais testados foram significativamente menores que aqueles obtidos no ensaio flexural de três pontos. A resistência flexural biaxial em geral apresentou valores entre a flexural de quatro pontos e a de três pontos. Além disso, pôde-se observar que a resistência das cerâmicas para revestimento em zircônia foi similar aquelas para técnica metalo-cerâmica.

Hooshmand et al., em 2008, avaliaram o efeito do condicionamento ácido da superfície na resistência à flexão biaxial de duas cerâmicas reforçadas por leucita e por cristais de dissilicato de lítio. Pela técnica de prensagem a alta temperatura foram obtidos 40 discos de cerâmica (diâmetro de 14 mm por 2 mm de espessura), sendo 20 discos de cerâmica reforçada por leucita e 20 reforçados por dissilicato de lítio. Todos os espécimes foram polidos e então limpos por ultrassom em água destilada. Dez espécimes de cada grupo de cerâmica foram, então, condicionados com 9% de gel de ácido fluorídrico (HF) por 2 minutos e limpas por ultrassom novamente. A resistência flexural biaxial foi mensurada pelo ensaio de pistão-em-três-esferas em uma máquina universal de ensaios. Os dados de cada grupo (n=10) foram analisados por ANOVA ($\alpha = 0,05$). A microestrutura das superfícies de cerâmica, antes e após o condicionamento ácido também foi examinada por um microscópio eletrônico de varredura. Os valores médios de resistência à flexão biaxial (MPa) para cada grupo foram: IPS Empress = $118,6 \pm 25,5$; IPS Empress condicionado = $102,9 \pm 15,4$; IPS Empress 2 = $283,0 \pm 48,5$; e IPS Empress 2 condicionado = $250,6 \pm 34,6$. Os resultados mostraram que o processo de corrosão reduziu a resistência flexural biaxial significativamente para os dois tipos de cerâmica ($p = 0,025$). Nenhuma interação significativa entre o tipo de cerâmica e processo de corrosão foi encontrada ($p = 0,407$). Diante desses resultados, concluiu-se que o ataque ácido da superfície poderia ter um efeito de enfraquecimento em sistemas cerâmicos reforçados por leucita ou por dissilicato de lítio.

Salgado (2008) estudou a influencia de regimes de polimerização

(um de dois passos com baixa irradiância inicial, e dois contínuos) e do pré-aquecimento sobre a resistência flexural no ensaio de três pontos, a adaptação marginal de restaurações, grau de conversão e microdureza Knoop de um compósito. O nanocompósito Filtek Z350 foi submetido às seguintes condições experimentais: sem e com pré aquecimento a 68°C; fotopolimerização de três formas - 600mW/cm² por 20s ou 40s ou 200mW/cm² por 20 segundos + intervalo de 1 minuto + 500mW/cm² por 40 segundos. A resistência à flexão foi realizada após as amostras armazenadas em água destilada por 24 horas. Os resultados mostraram que o regime de fotoativação de 2 passos causou redução dos valores médios de resistência flexural. O pré-aquecimento não influenciou os resultados. O valor médio de resistência a flexão pelo método de fotoativação contínuo por 20s foi de 179,29 ± 9,4 MPa. O menor valor de resistência a flexão encontrado foi para o grupo com baixa irradiância inicial com pré-aquecimento (151,71 ± 16,3). A autora concluiu que o pré-aquecimento do compósito estudado não afetou o grau de conversão e a resistência a flexão, mas promoveu um melhor vedamento da interface adesiva. O regime de fotoativação com baixa irradiância inicial produziu grau de conversão similar ao de formas contínuas, mas reduziu a resistência flexural do compósito.

Borba et al., em 2009, avaliaram a resistência à flexão (σ) e dureza (H) de compósitos diretos e indiretos, testando a hipótese de que resinas compostas diretas produzem maiores valores de σ e de H que resinas compostas indiretas e que estas propriedades estão positivamente relacionadas. Dez espécimes em forma de barra (25 mm x 2 mm x 2 mm) foram confeccionados para cada material direto [D250 - Filtek Z250 (3M-ESPE) e D350 - Filtek Z350 (3M ESPE)] e indireto [Isin-Sinfony (3M- ESPE) e IVM - VitaVM LC (Vita Zahnfabrik)], de acordo com as instruções do fabricante e de acordo com as especificações da norma ISO 4049. O σ foi testado em um ensaio flexural de três pontos usando uma máquina de ensaio universal (EMIC DL 2000) com uma velocidade de 0,5 mm/min. Dureza Knoop (H) foi mensurada em fragmentos dos espécimes resultantes do teste σ . Os dados foram analisados estatisticamente usando Anova e teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). A

resistência flexural média e desvio padrão (MPa) e grupo estatístico foram: D250 - $135,4 \pm 17.6a$; D350 - $123,7 \pm 11.1b$; Isin - $98,4 \pm 6.4c$; IVM - $73,1 \pm 4.9d$. O H médio, desvio padrão (kg/mm²) e agrupamento estatístico foram: D250 - $98,12 \pm 1.8a$; D350 - $86,5 \pm 1.9b$; Isin - $28,3 \pm 0.9c$; IVM - $30,8 \pm 1.0c$. Os sistemas de compósitos diretos examinados produziram maiores valores médios de σ e H do que os compósitos indiretos, e os valores médios dessas propriedades foram positivamente correlacionados ($r = 0,91$), confirmando as hipóteses do estudo.

Em 2009, Curtis et al., estudaram a influência das nanopartículas e de aglomerados de nanopartículas na composição da carga (RBC) e na flexão biaxial (BFS) de resinas compostas após serem pré-cicladas e armazenadas em um ambiente seco ou úmido. Sete materiais restauradores [Heliomolar (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein), Z100 MP Restaurativa, Filtek Z250, Filtek Supreme (3M ESPE, St. Paul, MN, EUA) de Corpo (FSB) e translúcido (FST), Grandio e Grandio Flow (VOCO, Cuxhaven, Alemanha)], foram investigados. As amostras foram pré-carregadas com 20, 50 ou 100N por 2000 ciclos e armazenadas em ambiente seco ou molhado antes do ensaio BFS. Os autores observaram que os nanoaglomerados forneceram um mecanismo de reforço distinto em comparação com os sistemas de partículas micro-híbrida, micropartículas ou nanohíbrida, resultando em melhorias significativas para a resistência e confiabilidade, independentemente do ambiente de armazenamento e condições de ensaios. A infiltração de silano nos interstícios das nanopartículas pode modificar a resposta à tensão induzida pré-carregamento, aumentando assim a tolerância a danos e fornecendo o potencial para um melhor desempenho clínico.

Em 2010, Nakamura et al. testaram a hipótese de que o glazeamento afetaria o módulo de Weibull ou a resistência média à flexão de cerâmicas dentais. Quatro grupos ($n = 30$) das amostras foram preparados a partir de cerâmica feldspática de corpo (Vita VMK 68). As amostras foram testadas em grupos: condição glazeada original (controle), e depois de lixar separadamente com abrasivos de carbetto de silício nas granulações 1000, 600 e 100. Um ensaio de flexão de três pontos foi realizado para cada amostra. A

resistência à flexão da cerâmica e o módulo de Weibull foram obtidos utilizando um programa de computador com obtenção dos dados após carregamento das amostras até a fratura. A resistência à flexão diminuiu com o aumento da rugosidade superficial e as diferenças foram significativas ($p < 0,05$), conforme determinado pelo teste de Tukey, exceto entre o grupo de 600 e do grupo 100. O módulo de Weibull do grupo de vidro foi o maior (16,3), e a rugosidade superficial influenciou o módulo de Weibull.

Entre outras propriedades, resistência à flexão e módulo de elasticidade de 7 de compósitos odontológicos (Filtek Z350 e Filtek Z250 - TM/3M ESPE; Grandio, Polofil Supra / VOCO; TPH Spectrum, TPH3, Esthet-X TM/Denstply) foram investigadas por Monteiro & Montes (2010). Para resistência flexural e módulo de elasticidade, as amostras foram preparadas de acordo com as especificações ISO 4049 ($n = 10$). A análise estatística dos dados foi realizada com ANOVA one-way e o teste de Tukey. Grandio apresentou valores médios de resistência flexural (141,07 MPa) e módulo de elasticidade (13,91 GPa) significativamente maiores que os outros materiais testados. A resina Filtek Z350 apresentou resistência flexural média de 130,44 MPa e módulo de elasticidade de 8,82 GPa. Para os autores, o tipo de monômero e outros fatores como tamanho e composição de partículas, quantidade de iniciadores e qualidade de silanização também podem contribuir para o desenvolvimento de propriedades físicas e mecânicas. Para os autores, o uso de protocolos padronizados, tais como ISO 4049, permite que os resultados de diferentes estudos sejam comparados. Apesar de tal padronização, os dados do estudo demonstraram uma grande variação, que talvez não seja surpreendente. Segundo os autores, devido a presença de algumas variáveis que podem influenciar os resultados, tais como tempo de exposição, intensidade de luz e até mesmo o uso de caixas de luz em vez de unidades convencionais de luz. Além disso, ainda existem limitações ao tentar extrapolar estes resultados para a realidade clínica, uma vez que a norma ISO 4049 para ensaios de resistência à flexão recomenda submersão da amostra em água destilada por apenas 24 horas antes do ensaio. Além disso, a amostra é submetida para apenas um ciclo mecânico antes de submeter à fratura. Estas

especificações não refletem o desempenho do material em longo prazo.

Em 2010, Piccioni dissertou sobre a avaliação da resistência à flexão e determinação de propriedades mecânicas de resinas compostas e sua aplicação no método de elementos finitos. De acordo com a autora, o método de elementos finitos constitui-se de uma ferramenta computacional que permite simular condições específicas em materiais e determinar a resposta para essas condições. O objetivo do trabalho foi determinar a resistência flexural de resinas compostas, suas propriedades mecânicas e analisar a aplicabilidade do método de elementos finitos para tal situação. As resinas compostas utilizadas no trabalho foram uma nanohíbrida, uma nanoparticuada e uma microparticulada, sendo Tetric N- Ceram - Ivoclar Vivadent, Filtek Z350 – 3M Espe e Heliomolar – Ivoclar Vivadent, respectivamente. O ensaio de flexão foi realizado de acordo com a norma ISO 4049 (resistência flexural de três pontos). As amostras foram obtidas em matriz metálica em incremento único. Depois de polimerizadas as amostras foram acabadas e armazenadas em água destilada por 24 horas a 37°C. Em seguida as amostras foram retiradas da água e mensuradas para realização do ensaio flexural de três pontos. Outra parte do trabalho foi à determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. Por fim, a terceira etapa foi a elaboração da análise de elementos finitos com dados obtidos a partir da segunda etapa do estudo, comparando os resultados obtidos experimentalmente com os computacionais. De maior interesse, o valor médio de resistência flexural da resina Filtek Z350 foi de 96,13Mpa. A análise por elementos finitos foi semelhante qualitativamente à condição experimental, uma vez que a análise da distribuição das tensões mostrou a concentração das mesmas em regiões compatíveis com as regiões de falha das amostras, embora os valores absolutos obtidos no ensaio tenham sido discrepantes dos simulados na análise por elementos finitos.

Pick et al. (2010) avaliaram os ensaios de resistência flexural biaxial e o de três pontos com amostras menores que o padrão ISO 4049, aplicados a resinas compostas com base em parâmetros Weibull, características fractográficas e distribuição de tensão. Para tanto, foram preparados discos de 15 mm x 1 mm e barras de 10 mm x 2 mm x 1 mm de três resinas compostas

comerciais (Concept/Vigodent, CA; Heliomolar/Ivoclar-Vivadent, HE; Z250/3M ESPE, FZ). Após 48 horas de armazenamento a seco a uma temperatura de 37 graus, os discos e as barras foram submetidos ao ensaio de pistão em três esferas (BI) e de flexão em três pontos (UNI), respectivamente. Os dados foram analisados pela estatística de Weibull. As superfícies fraturadas foram analisadas em estereomicroscópio e por microscópio eletrônico de varredura. Distribuição de tensão principal máxima (σ_1) foi determinada pela análise por elementos finitos. Para o ensaio biaxial, as resistências características foram 169.9a (FZ), 122.4b (CA) e 104.8c (HE), e para o de três pontos foram: 160.3a (FZ), 98.2b (CA) e 91.6b (HE). O módulo de Weibull (m) foi similar dentro do mesmo ensaio. CA e HE apresentaram m estatisticamente maior para o biaxial. Poros na superfície (BI) e falhas de borda (UNI) foram às origens de fratura mais frequentes. Os autores concluíram que comparado ao ensaio de três pontos, o ensaio biaxial foi mais sensível para detectar diferenças entre os compósitos e apresentou menor variação de dados para dois dos três materiais testados. Além disso, a discrepância apresentada entre a resistência analítica e a resistência estimada pela análise por elementos finitos, foi menor no ensaio biaxial. Os autores recomendaram o uso do ensaio biaxial em relação ao ensaio de três pontos com amostras menores para verificação da resistência flexural de compósitos.

Em 2011, Huang & Hsueh avaliaram a aplicação do método biaxial pistão-em-três-esferas para os discos monocamada e de várias camadas. Análises de elementos finitos foram realizadas para simular ambos os ensaios. Diferentes graus de atrito entre a superfície da amostra no suporte de apoio de carregamento foram considerados nas simulações. A distribuição de tensões biaxial simulada através da espessura do disco para ambos os ensaios foi então comparada com a fórmula para examinar como as previsões feitas pelo método de elementos finitos concordam. Assim, modelos de discos monocamadas, bicamadas e tricamadas foram submetidos a carregamentos simulados com pistão-em-três-esferas e pistão-em-anel para comparação com as fórmulas. Os resultados dependeram de atrito quando o disco foi suportado por um anel, porém se tornaram insensíveis ao atrito quando o disco foi

apoiado por três esferas. Para o contato sem atrito ambos os ensaios de carga renderam a distribuição de tensões biaxial quase idêntica através da espessura do disco e houve boa concordância com a fórmula. Por outro lado, a tensão de tração máxima na superfície do disco diminuiu quando o atrito aumentou. Como resultado, a resistência à tração biaxial foi superestimada para o ensaio com pistão-em-anel quando o atrito foi negligenciado. Assim, os resultados das análises de elementos finitos dos autores demonstraram como o atrito entre a superfície de apoio da amostra no suporte de carregamento afeta avaliação da resistência flexural nos ensaios biaxial pistão-em-três-esferas e pistão-em-anel. É fundamental ter contato sem atrito entre o disco e o anel de apoio ao avaliar a força biaxial em ensaios de pistão-em-anel. Caso contrário, a aplicação da fórmula aproximada, utilizada no ensaio pistão-em-três-esferas, que foi derivada do ensaio de pistão-em-anel, é ainda melhor para o primeiro. Isso é verdade não só para discos monocamada, mas também discos de múltiplas camadas.

Pelaez-Vargas et al. (2011) afirmaram que procedimentos de mistura de um passo e incremental são atualmente utilizados para a produção de pastas de cerâmica dental. Na indústria cerâmica alta qualidade é obtida usando uma etapa de mistura, mas em odontologia, o melhor método ainda não foi determinado. Por isso, avaliaram os efeitos de duas técnicas de mistura na resistência flexural biaxial e microestrutura da cerâmica dental. Discos de cerâmica feldspática (2 x 15 mm de diâmetro) foram produzidos e divididos de acordo com o método de preparação da pasta cerâmica, sendo grupo incremental de pó-líquido de mistura (n = 50) ou de uma etapa de mistura, como um grupo controle (n = 50). As amostras foram testadas para resistência à flexão biaxial e caracterizados utilizando porosimetria, umidade relativa, SEM / EDS, difração de raios-x e análise térmica infra-vermelha. Análise estatística foi realizada utilizando estatísticas Weibull. O módulo de Weibull, resistência característica e umidade relativa foram comparados entre os grupos, usando t-Student e Mann-Whitney U test ($\alpha = .05$). O grupo de mistura incremental pó-líquido apresentou valores significativamente mais elevados de módulo Weibull (6,74 (0,70), $P < 0,001$) e resistência característica (79,87 (2,01) MPa, P

<0,001) quando comparado com o grupo de mistura de uma etapa (4,94 (0,94) e 75,95 (2,61) MPa). Valores médios significativamente menores de umidade relativa ($P = .009$) foram encontrados para o grupo incremental de mistura (20% (0,5%)), em comparação ao grupo de mistura de um passo (22% (1%)). No teste de difração de raios-x os espectros mostraram que o grupo de uma etapa de mistura produziu maior quantidade de fase amorfa. Concluiu-se que espécimes produzidos pela técnica de mistura incremental mostraram maior resistência à flexão biaxial do que o grupo de uma etapa de mistura.

3 - PROPOSIÇÃO:

Esse estudo teve por objetivo:

- 1) Determinar e comparar a resistência flexural de diferentes materiais restauradores e analisar sua influencia sua resistência.
- 2) Investigar a influência do método de avaliação na resistência flexural dos materiais restauradores
- 3) Investigar a confiabilidade e sensibilidade dos métodos experimentais e a correlação de seus resultados com o ensaio por elementos finitos, analisando-se a concentração de tensões geradas.
- 4) Analisar os padrões de fratura dos testes e se eles correspondem as áreas de maior tensão geradas no ensaio por elementos finitos.

4 - MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados quatro materiais restauradores: resina Filtek Z350 XT (3M ESPE, Dental Products, EUA), cerômero Epricord (Kuraray Medical Inc. – Japão), cerâmica feldspática Super Porcelain EX-3 (Noritake Kizai Co. – Japão) e cerâmica injetável IPS Empress 2 (Ivoclar Vivadent Inc., Liechtenstein), de acordo com a Tabela 1. A resistência flexural dos materiais restauradores foi analisada utilizando-se os métodos de três pontos, de quatro pontos e o biaxial. Foram obtidas amostras em formato de barra e formato de disco, conforme normas da ISO 4049 (2000) e 6872 (2008) e divididas em 12 grupos (n=15) conforme Tabela 2.

Tabela 01. Caracterização dos materiais utilizados.

Tipo de material	Marca comercial/cor	Fabricante	Composição	País	Sigla
Resina composta	Filtek Z350 / A3 Body	3M ESPE Dental Products	BIS-GMA, BIS-EMA, UDMA, TEGDMA. Carga: nanopartículas de sílica não-aglomerada / não-agregada e nanoaglomerados de zircônia/sílica, aglomerados. A porcentagem de carga é de 78.5%, em peso (de acordo com o fabricante).	USA	Z350

Continua

Tipo de material	Marca comercial/comer	Fabricante	Composição	País	Sigla
Cerômero	Epricord / A3 Dentina	Kuraray Medical Inc.	UDMA, TEGDMA, <i>dl</i> -Canforoquinona, pigmento, carga (fase orgânica pré-polymerizada, carga vítrea silanizada e sílica coloidal silanizada) e outros. Aprox.. 24% de monômeros metacrilatos e 76% de carga, em peso. A quantidade de carga inorgânica é cerca de 48,5% (Izumida et al., 2008; Hirata et al., 2011).	JPN	EPR
Cerâmica feldspática	Superporcelain EX-3 / A3B	Noritake Kizai Co.	Basicamente Si – 8.83%, C – 19,86%, O – 19,35%, F – 0,95%, Na – 6,94%, Mg - 0,33%, Al - 3,41%, K – 0,53%. Quantidade total de sílica de cerca de 8,5 a 9%.	JPN	NOR
Cerâmica reforçada	IPS Empress 2 / A3	Ivoclar Vivadent Inc.	57-80% SiO ₂ , 11-19% Li ₂ O, 0-13% K ₂ O, 0-11% P ₂ O ₅ , 0-8% ZnO, 0-5% MgO, 0.1-6% La ₂ O ₃ , 0-5% Al ₂ O ₃ , e 0-8% pigmentos, em peso. Cristais alongados de dissilicato de lítio interligados formam 65% da microestrutura (Gonzaga et al., 2008).	LIE	EMP

Tabela 02. Composição dos grupos e dimensões das amostras.

MATERIAL	GRUPO	MÉTODO	Amostras	
			Forma	Dimensões
Resina composta	Z350-3	três pontos	Barra	25 x 2 x 2
	Z350-4	quatro pontos	Barra	25 x 2 x 2
	Z350-B	Biaxial	Disco	12 x 1.2
Cerômero	EPR-3	três pontos	Barra	25 x 2 x 2
	EPR-4	quatro pontos	Barra	25 x 2 x 2
	EPR-B	Biaxial	Disco	12 x 1.2
Cerâmica feldspática	NOR-3	três pontos	Barra	25 x 2 x 2
	NOR-4	quatro pontos	Barra	25 x 2 x 2
	NOR-B	Biaxial	Disco	12 x 1.2
Cerâmica reforçada	EMP-3	três pontos	Barra	25 x 2 x 2
	EMP-4	quatro pontos	Barra	25 x 2 x 2
	EMP-B	Biaxial	Disco	12 x 1.2

4.1- Obtenção das amostras para os ensaios mecânicos de três e quatro pontos

4.1.1 Resina composta

Foram utilizadas matrizes bipartidas em aço inoxidável com dimensões internas de $25 \pm 2\text{mm}$ de comprimento, $2 \pm 0,1\text{mm}$ de espessura e $2 \pm 0,1\text{mm}$ de largura. A matriz foi posicionada sobre uma placa de vidro com uma tira de poliéster entre eles e cuidadosamente preenchida com a resina Filtek Z350 XT em único incremento. Após preenchimento a resina foi recoberta com outra tira de poliéster sobre a qual uma lâmina de vidro foi posicionada e mantida sobre pressão (figura 1).

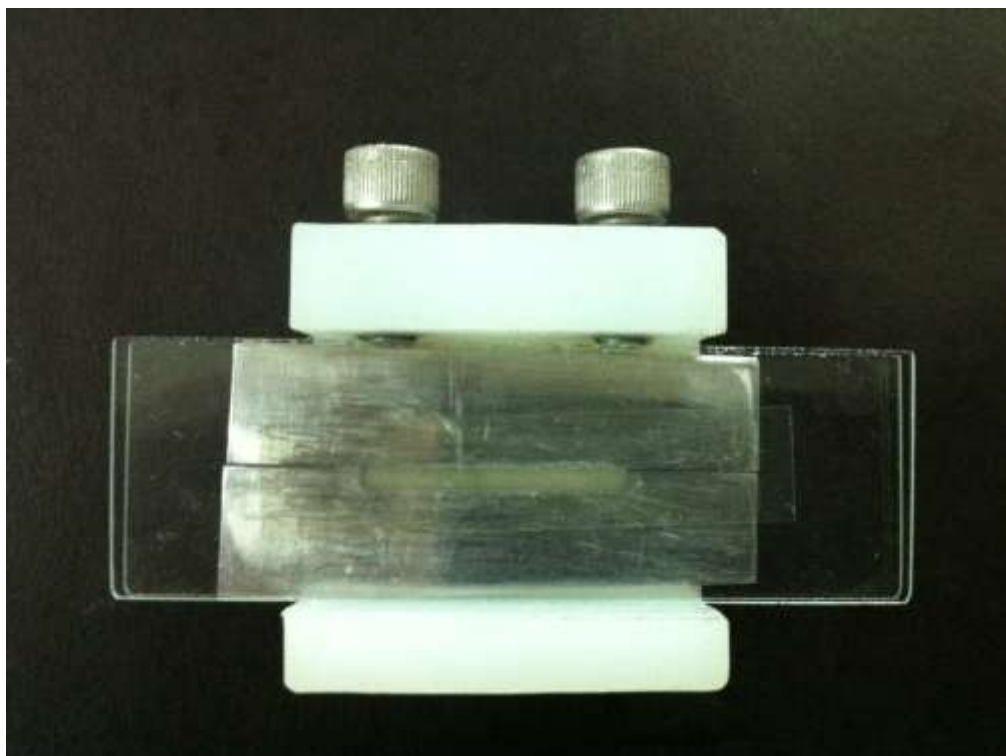


Figura 01. Resina composta imediatamente antes da fotopolimerização, inserida no conjunto matriz, lâmina de vidro, tira de poliéster.

A superfície superior foi então polimerizada com três incidências de luz de 20 segundos, com ponta de 12 mm de diâmetro em contato com a superfície da lâmina de vidro. A unidade polimerizadora utilizada foi de luz halógena (Optilux 501 – Kerr Products, Orange, CA, USA) com uma janela de saída de 12 mm de diâmetro e uma intensidade igual a 800 mW/cm^2 , previamente verificada por radiômetro (Optilux 501 – Kerr Products, Orange, CA, USA). A primeira incidência foi no centro da amostra e a segunda e terceira incidências lateralmente à primeira até a extremidade da resina com sobreposição parcial da primeira área irradiada (Figura 02 e 03). Em seguida, o mesmo procedimento de polimerização foi realizado na superfície inferior. Após a polimerização o conjunto foi colocado em água destilada a $37^{\circ}\pm 1 \text{ C}$ por 15 minutos. As amostras foram então separadas de seus moldes e as superfícies que receberam a luz foram cuidadosamente padronizadas e armazenadas de acordo com item 4.3 (ISO 4049, 2000).

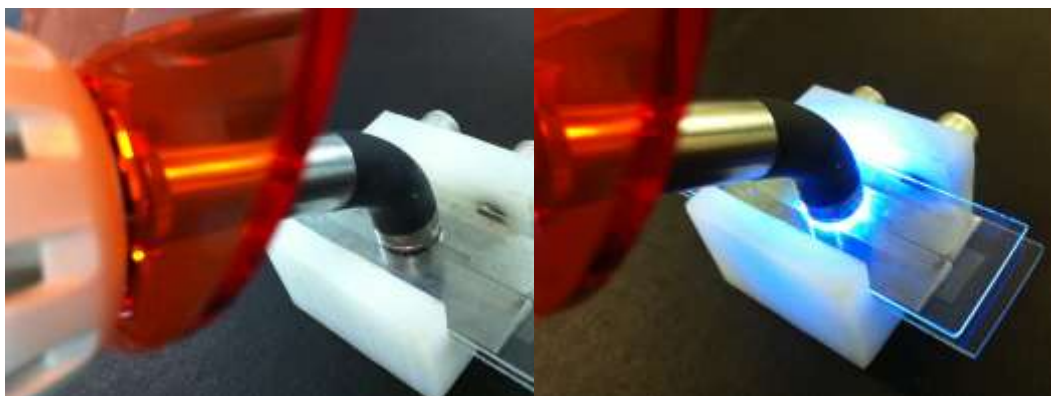


Figura 02. Fotopolimerizador posicionado no centro da amostra (a) e início da polimerização (b) da amostras para o ensaio de três pontos.

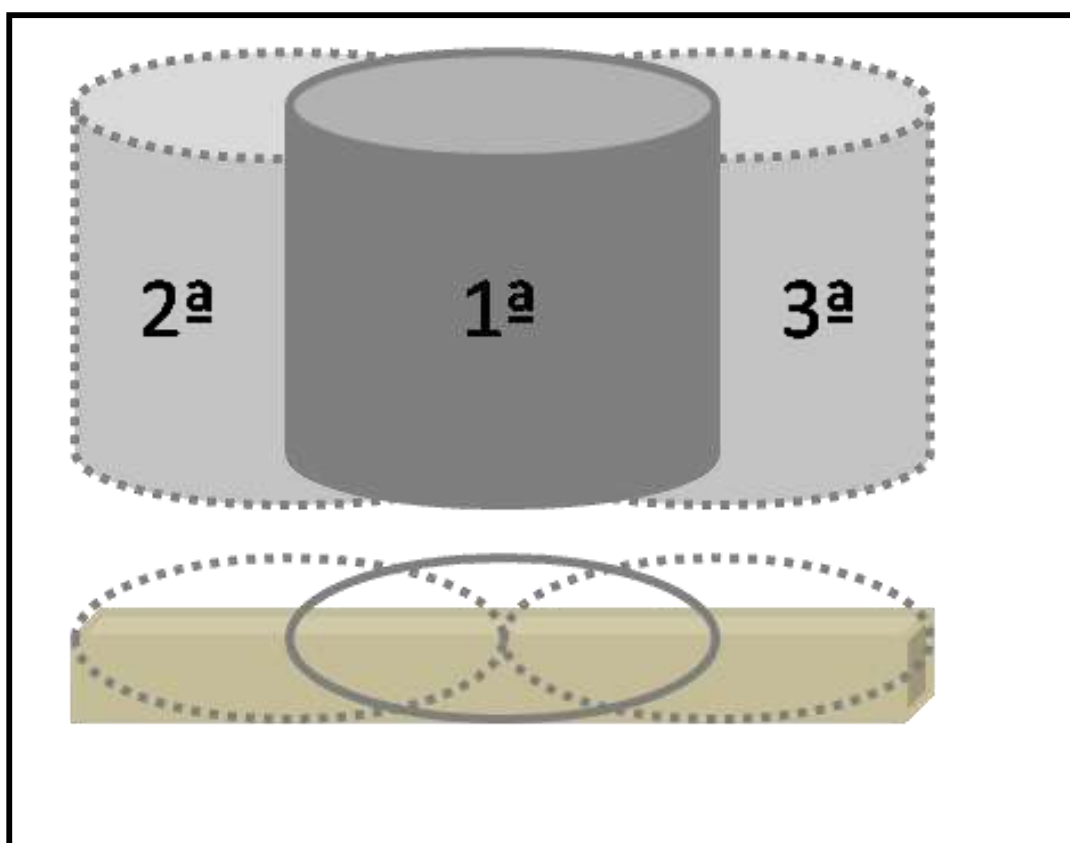


Figura 03. Esquema de polimerização das amostras de resina composta para os ensaios de resistência flexural de três e quatro pontos.

4.1.2 Cerômero

As mesmas matrizes e mesma técnica de preenchimento usadas para o grupo da resina Z350 foram utilizadas para o cerômero. Entretanto, a

forma de polimerização foi diferente, seguindo recomendações do fabricante. A polimerização foi realizada em dois tempos em forno de polimerização (Strobolux - EDG Equipamentos, São Carlos). Após a primeira polimerização por 30 segundos, as amostras foram cuidadosamente removidas das matrizes e realizou-se então a segunda polimerização por 180 segundos. O mesmo processo de padronização superficial e armazenagem usados no grupo da resina composta foram feitos para as amostras de cerômero.

4.1.3 Cerâmica feldspática

Para confecção das amostras de cerâmica feldspática foram utilizadas matrizes pré-fabricadas em aço com medidas de 30 mm x 2,5 mm x 2,5 mm, determinadas previamente por estudo piloto, para compensação da contração sofrida pelo material após a queima. O pó cerâmico e uma quantidade adequada de água destilada foram misturados com o auxílio de um pincel número 7 (Kolinsky Kota - Kota Imports, São Paulo), formando uma lama pegajosa (de acordo com as instruções do fabricante), preenchendo toda a matriz com o auxílio de aparelho vibrador (VH Goldline – VH Equipamentos, Araraquara) (Figura 4 esq.). Em seguida, o excesso de líquido foi retirado com o auxílio de um papel absorvente (Kiss – Santher, Bragança Paulista), as amostras cuidadosamente removidas da matriz, com o auxílio de uma lâmina de vidro e colocadas em uma base refratária e levadas para queima em forno (Alumini Line Press 2 - EDG Equipamentos, São Carlos) após cuidadosa inspeção visual na tentativa de identificar defeitos e trincas nas amostras (figura 4 dir.). Elas foram então queimadas de acordo com as recomendações do fabricante. A temperatura inicial e o início do vácuo se deu a 600°C com taxa de elevação de 45°C/min, remoção do vácuo a 920°C e temperatura final de 930°C. O mesmo processo de padronização superficial e armazenagem usados nos grupos da resina composta e do cerômero foram feitos para as amostras de cerâmica feldspática.

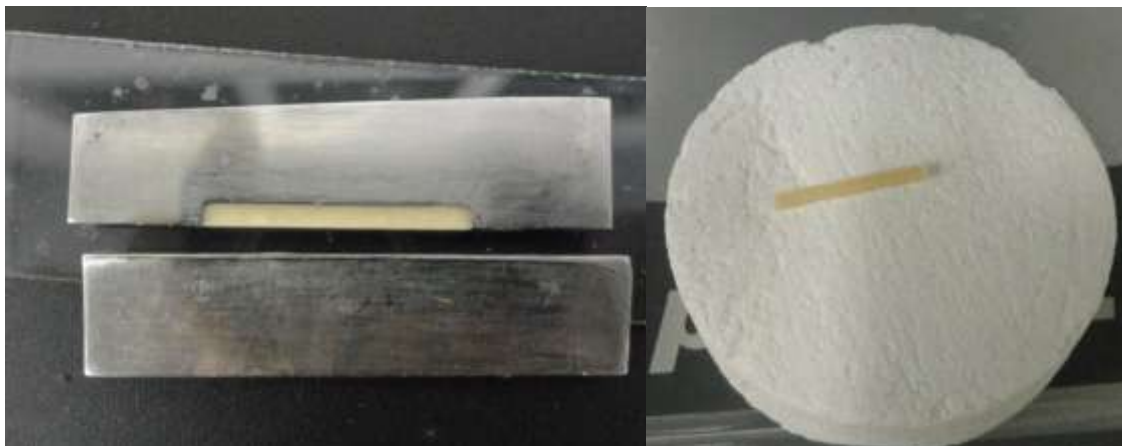


Figura 4. Confeção das amostras em cerâmica feldspática e posicionamento das mesmas no refratário para a queima.

4.1.4 Cerâmica Reforçada

Para a confecção das amostras em cerâmica reforçada foi utilizada a técnica de prensagem a quente utilizando forno específico (Programat EP5000 – Ivoclar Vivadent Inc., Liechtenstein) pela técnica da cera perdida. As amostras foram inicialmente construídas em cera com dimensões de $25 \pm 2\text{mm} \times 2 \pm 0,1\text{mm} \times 2 \pm 0,1\text{mm}$ (Figura 5 esq.), incluídas em revestimento, aquecidas e a cerâmica injetada conforme orientações do fabricante. A temperatura inicial do forno foi 700°C , a taxa de aquecimento foi 60°C por minuto, a temperatura de injeção foi 920°C com manutenção por 20 minutos e velocidade do êmbolo de $300 \mu\text{m}/\text{min}$. Após prensagem, os anéis com revestimento foram retirados do forno e deixados esfriar a temperatura ambiente (Figura 5 centro e esq.). O conduto alimentador foi cortado com disco diamantado dupla face (FAVA – Franco da Rocha). O mesmo processo de padronização superficial e armazenagem usados nos grupos da resina composta, cerômero e cerâmica feldspática foram feitos para as amostras de cerâmica reforçada.

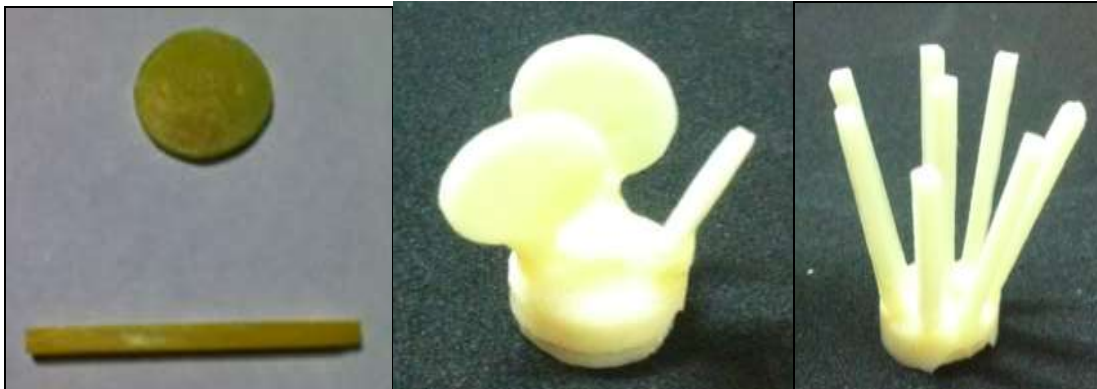


Figura 5. Amostras para o ensaio com cerâmica reforçada em cera (esq.) e previamente ao corte do conduto alimentador (centro e dir.)

4.2 Obtenção das amostras para o ensaio mecânico biaxial

4.2.1 Resina composta

As amostras para esse grupo foram obtidas da mesma forma citada anteriormente, conforme item 4.1.1, diferindo apenas no formato. A matriz permitia a convecção de amostras em forma de disco e tinha dimensões de 12 mm de diâmetro e 1,2 mm de espessura (ISO 6872, 2008). Nesse caso, devido às pequenas dimensões do material, apenas uma irradiação por 20 segundos de um dos lados foi necessária (Yap & Teoh, 2003; Chung et al., 2004; Pick et al. 2010) (figura 6). A padronização superficial, armazenamento e medição seguiram o exposto no item 4.3.



Figura 06. Conjunto de polimerização para amostras em resina composta para o ensaio biaxial antes e durante a polimerização.

4.2.2 Cerômero

As amostras para esse grupo foram obtidas da mesma forma citada anteriormente, conforme item 4.1.2, diferindo apenas no formato. Após polimerização e padronização superficial as amostras em formato de disco apresentaram dimensões finais aproximadas de 12 mm de diâmetro por 1,2 mm de espessura. A padronização superficial, armazenamento e medição seguiram o exposto no item 4.3.

4.2.3 Cerâmica feldspática

Para confecção das amostras de cerâmica feldspática, as dimensões da matriz de aço foram o diâmetro de 15 mm e a espessura de 2 mm (Fleming et al., 1999, 2003), determinadas previamente por estudo piloto, para compensação da contração sofrida pelo material após a queima. As amostras para esse grupo foram obtidas da mesma forma citada anteriormente, conforme item 4.1.3, diferindo apenas no formato. Após remoção do forno e padronização superficial, de acordo com item 4.3, as amostras em formato de disco apresentaram dimensões finais semelhantes as amostras em formato de disco com os outros materiais.

4.2.4 Cerâmica Reforçada

O processo de obtenção das amostras foi igual àquele descrito no item 4.1.4, porém com as amostras no formato de disco com dimensões finais aproximadas de 12 mm de diâmetro e 1,2 mm de espessura. A padronização superficial, armazenamento e medição seguiram o exposto no item 4.3.

4.3 - Padronização superficial, armazenamento e medição das amostras

Todas as amostras foram padronizadas com o auxílio lixas d'água nas granulações 220, 500 e 1200 (Fischer et al. 2008) (Figura 07), completamente limpas de detritos em ultrassom por 15 minutos (Thornton - Inpec Eletrônica Ltda., São Paulo, Brasil) e permaneceram armazenadas em água destilada a $37^{\circ}\pm 1$ C por 24 horas. Após o armazenamento, as amostras tiveram suas dimensões verificadas (Figura 08) e foi certificado se as faces não

diferiam mais que 0,05mm em paralelismo por meio de um paquímetro digital (Mitutoyo, Tóquio, Japão) e procederam-se imediatamente os ensaios.



Figura 07. Acabamento das amostras em lixa d' água granulação 220 (esq.) e 500 (dir.).



Figura 08. Aferição das medidas finais das amostras após padronização superficial.

4.4 Ensaios mecânicos

4.4.1 Ensaio flexural de três pontos

Os ensaios de flexão de três pontos foram realizados em máquina de ensaios mecânicos (EMIC 2000 DL, São José dos Pinhais). O diâmetro dos suportes e do pistão foi de 2mm, como requerido pela ISO 4049 (2000), sendo todos eles cilíndricos e em contato com a amostra de forma longitudinal, perpendicular ao longo eixo da amostra. A distância entre os apoios foi de 20 mm (Chung et al., 2004) e o ponto de carga na metade da distância entre os

apoios (Figura 09 e 10). A velocidade utilizada foi de 1 mm/min e a carga registrada no momento da fratura foi considerada para o cálculo da resistência flexural (Chung et al., 2004).

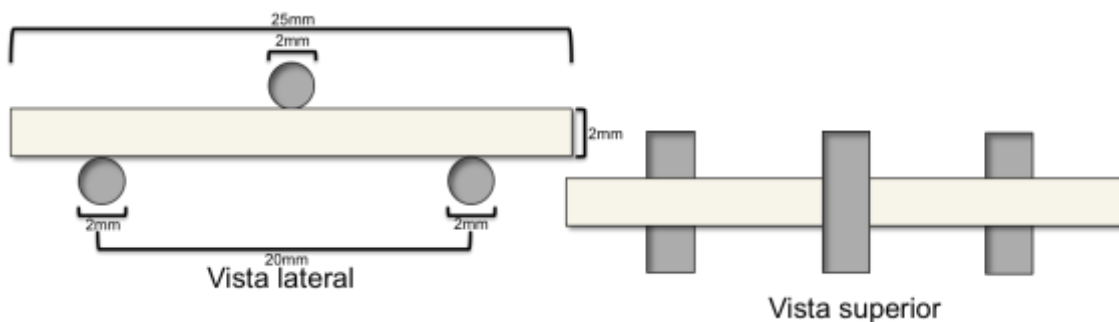


Figura 09. Esquema do método de ensaio flexural de três pontos.



Figura 10. Imagem do método de ensaio flexural de três pontos.

A resistência flexural de três pontos foi calculada de acordo com a equação:

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (1)$$

onde σ é a resistência flexural em MPa, F é a carga obtida na fratura do espécime (N), l é a distância entre os dois suportes (mm), b é a largura do espécime (mm) e h a altura do espécime (mm) (Fischer et al. 2008).

4.4.2 Ensaio flexural de quatro pontos

O ensaio de quatro pontos diferiu do de três pontos pelo fato da carga ser aplicada com dois pontos distantes 10 mm entre si e cada um deles distante 5 mm do apoio localizado do mesmo lado (Figura 11 e 12).

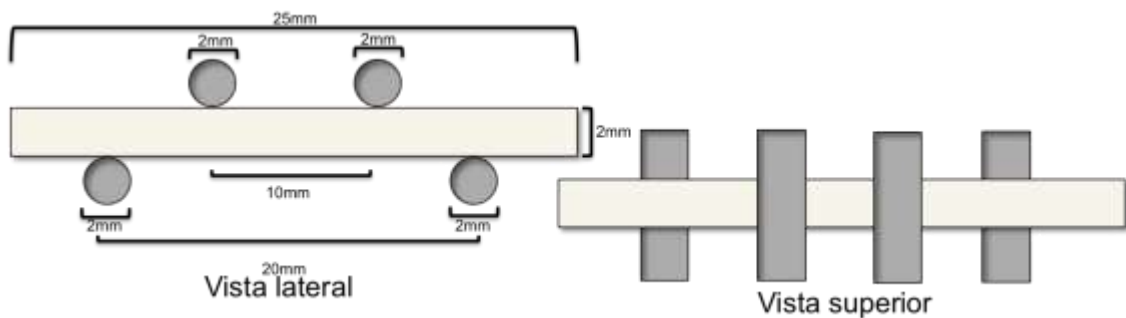


Figura 11. Esquema do ensaio flexural de quatro pontos



Figura 12. Imagem do método de ensaio flexural de quatro pontos.

A resistência flexural de quatro pontos foi calculada de acordo com a equação:

$$\sigma = \frac{3Fd}{2bh^2} \quad (2)$$

onde σ é a resistência flexural em MPa, F é a carga obtida na fratura do espécime (N), d é a diferença entre a distância entre os dois suportes e entre os dois pontos de carga (mm), b é a largura do espécime (mm) e h a altura do espécime em (mm) (Fischer et al. 2008).

4.4.3 Ensaio flexural Biaxial

Os ensaios de flexão biaxial foram realizados pela mesma máquina universal de ensaios mecânicos conforme normas da ISO 6872 (2008). O disco foi posicionado sobre uma base com três esferas de aço inoxidável com diâmetro de 3.2 mm de diâmetro cada, a 120° distantes uma da outra em uma circunferência de 10 mm de diâmetro. Entre a amostra e as esferas de suporte

foi colocada uma tira de poliéster de 0,05 mm de espessura (Preven – Guapirama – PR – Brasil) e outra entre a superfície e a ponta de carga para minimizar a tensão do contato direto da ponta de carga com a superfície da amostra. As amostras foram posicionadas concentricamente sobre as esferas e a carga foi aplicada no centro usando uma ponta de aço cilíndrica com extremo plano e diâmetro de 1,4 mm (Pick et al., 2010) conforme ilustrado na Figura 13 e 14. A velocidade utilizada foi de 1 mm/min e a máxima carga exercida na amostra antes da fratura foi obtida (Chung et al., 2004).

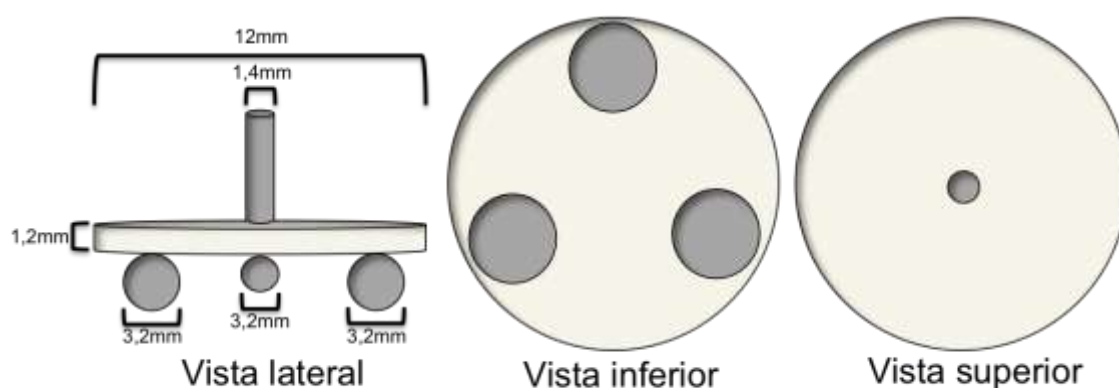


Figura 13. Esquema do método de ensaio flexural biaxial.



Figura 14. Imagem do método de ensaio flexural biaxial.

A resistência flexural biaxial foi calculada de acordo com a equação:

$$\sigma = \frac{-0.2387F(X-Y)}{d^2} \quad (3)$$

$$X = (1 + \nu) \ln (r_2 / r_3)^2 + [(1 - \nu) / 2] (r_2 / r_3)^2 \quad (4)$$

$$Y = (1 + \nu) [1 + \ln (r_1 / r_3)^2] + (1 - \nu) (r_1 / r_3)^2 \quad (5)$$

onde σ é a resistência flexural em MPa, F é a carga obtida na fratura do espécime (N), r_1 é o raio do círculo de suporte, r_2 é o raio da área de carga, r_3 o raio da amostra, d é a espessura da amostra na origem da fratura e o ν é o coeficiente de Poisson (Jin et al., 2004) para cada material (tabela 3).

Os valores de resistência flexural obtidos para todos os grupos foram submetidos à análise estatística ao nível de confiança de 5%.

Tabela 3. Propriedades mecânicas empregadas no ensaio biaxial e por elementos finitos.

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coeficiente de Poisson	Referências
Filtek Z350	16.6	0.24	Joshi et al., 2001
Epicord	18.8	0.24	Asmussen et al., 2005
Super Porcelain EX-3	65	0.23	Albakry et al. 2003
IPS Empress 2	96	0.23	Lin et al., 2011

4.5 - Análise por elementos finitos

Modelos tridimensionais foram criados a partir da padronização das amostras dos ensaios experimentais para realização do ensaio por elementos finitos. A geometria empregada visou simular e reproduzir as condições experimentais do ensaio de resistência flexural biaxial, de três pontos e de quatro pontos. Todos os modelos foram criados e processados no software de análises Ansys (12.0 Release, Ansys Inc.). A figura 15 ilustra o processo de criação dos modelos empregados neste estudo. Todos os modelos foram malhados com elementos isoparamétricos, hexagonais (barra) e tetragonais (biaxial), modelo 20NODE186 e 8NODE85, respectivamente. A malhagem utilizou as propriedades obtidas por meio de revisão da literatura (tabela 3). Todos os materiais foram considerados, elásticos, lineares e homogêneos. Para o ensaio de flexão de três pontos foi aplicado um carregamento compressivo de 10N. No ensaio de flexão quatro pontos foram aplicados 02 forças de 5N cada, e para o ensaio biaxial foram criadas áreas de carregamento e apoio conforme figura 15. Nos modelos que simulam o ensaio biaxial foi aplicada pressão compressiva de 50N. Os valores utilizados representaram cerca de 30% da força obtida nos ensaios mecânicos no momento da fratura, para cada respectivo método. Todas as condições de contorno simulam o carregamento e apoio aplicados nos ensaios

experimentais. A análise da distribuição de tensões foi realizada por meio do critério de von Mises.

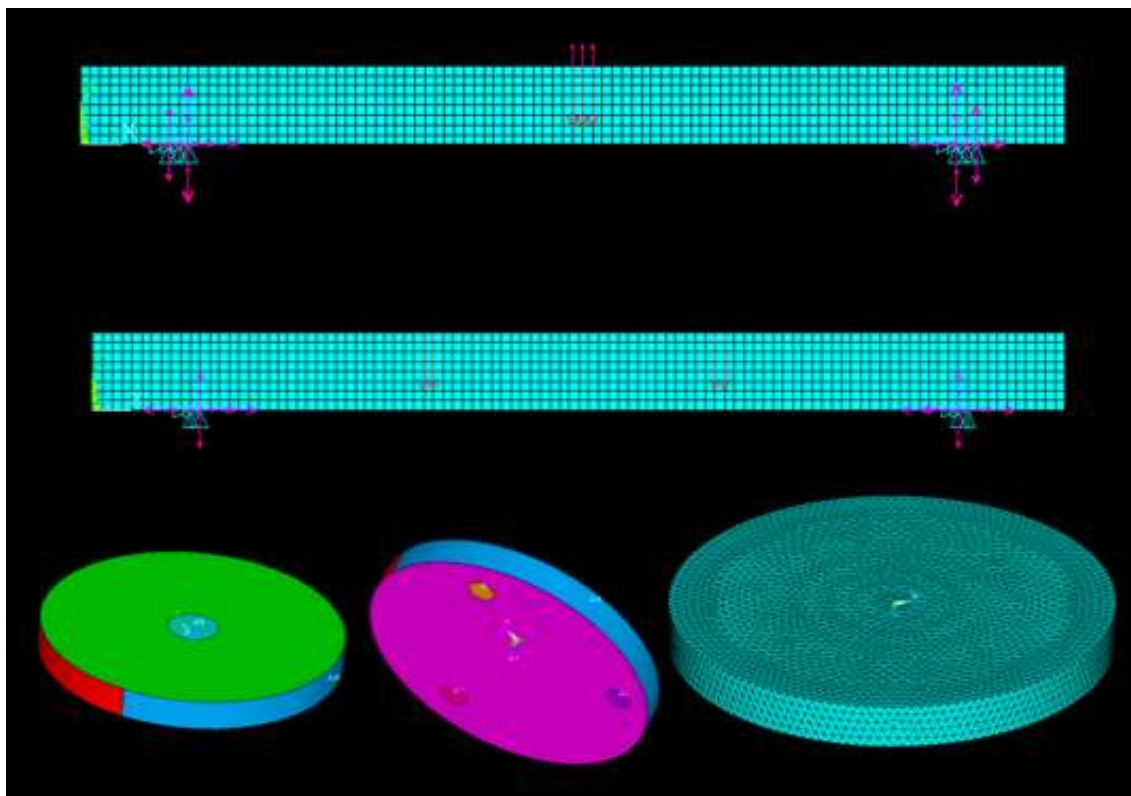


Figura 15. Processo de criação das malhas para elaboração dos ensaios por elementos finitos.

4.6 - Análise macroscópica das fraturas

Após o ensaio mecânico as amostras foram visualmente inspecionadas para determinação do local da fratura e do número de fragmentos.

5 - RESULTADOS

A análise exploratória dos dados indicou a transformação logarítmica na base 10 para que os mesmos atendessem as pressuposições de uma análise paramétrica. Após a transformação dos dados foi aplicada análise de variância (ANOVA) “two way” e teste de Tukey com $p < 0,05$. As análises foram realizadas no programa estatístico SAS 9.2, 2008 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Pela análise de variância houve diferença entre os materiais ($p < 0,0001$), entre os ensaios ($p < 0,0001$) e a interação material x ensaio foi significativa ($p < 0,0001$). A interação analisa o efeito de um fator sobre o outro fator (Paes, 2008).

Diferenças estatisticamente significantes entre os métodos foi observada, com maiores valores médios de resistência flexural para os ensaios de três pontos e biaxial em relação ao ensaio de quatro pontos ($p < 0,05$) para todos os materiais testados. Considerando-se o método, foram observadas diferenças significantes entre todos os materiais para o ensaio de três pontos e o biaxial com valores mais altos para o IPS Empress 2, seguido de resina Filtek Z350, cerâmica feldspática e cerômero. Dentro do ensaio de quatro pontos não foi detectada diferença significativa entre o cerômero e a cerâmica feldspática, e os valores mais altos foram para o IPS Empress 2, seguido da resina Filtek Z350. Independente do ensaio, o menor coeficiente de variação foi para o cerômero. Os maiores valores de coeficiente de variação foram observados para o ensaio de quatro pontos, exceto para o IPS Empress 2.

As médias de resistência flexural e parâmetros estatísticos estão apresentados na tabela 04. A figura 16 mostra a comparação gráfica dos resultados.

Tabela 04. Valores médios de resistência flexural (MPa), desvio padrão, comparações estatística e coeficiente de variação (%) dos grupos testados.

Material	Ensaio							
	três pontos			quatro pontos		Biaxial		
	CV			CV			CV	
Filtek Z350	155,02 (8,00)	Ab	5,16	128,43 (15,44)	Bb	12,02	171,18 (9,48) Ab	5,53
Epicord	68,48 (5,32)	Ad	7,76	56,58 (4,44)	Bc	7,84	71,57 (3,81) Ad	5,32
Sup. Porc. EX-3	87,03 (6,13)	Ac	7,04	59,58 (10,58)	Bc	17,75	84,29 (6,95) Ac	8,24
IPS Empress 2	294,8 (44,85)	Aa	15,21	176,35 (15,49)	Ba	8,78	333,19 (49,71) Aa	14,91

Letras distintas (maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical) indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os grupos.

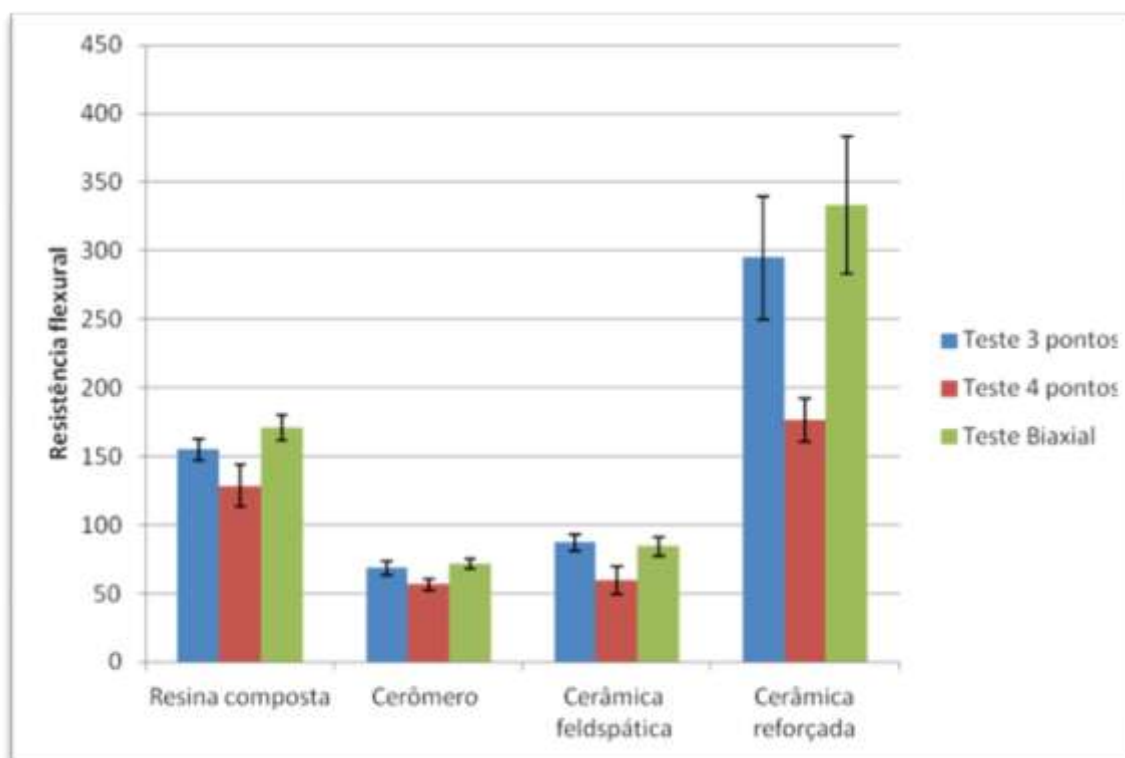


Figura 16. Média (MPa) e desvio padrão da resistência flexural dos materiais em função dos ensaios.

Com relação ao ensaio por elementos finitos, observou-se mais acúmulo de tensões no ponto de carregamento das amostras e abaixo do ponto de carregamento em todos os ensaios. Ficou evidente que os materiais poliméricos dissipam mais tensões no interior das amostras durante o carregamento. Já as cerâmicas, apresentam pontos específicos de

concentração de tensão e mínimas dissipações, quando comparadas com polímeros. Não houve diferenças evidentes entre resina composta e cerômero. É possível observar-se comportamentos distintos entre as duas cerâmicas testadas. O ensaio flexural de quatro pontos favorece maior dissipação de tensões na amostra, quando comparado com o ensaio de três pontos. O ensaio biaxial é menos influenciado pela geometria da amostra. O formato circunferencial parece favorecer maior acomodação e dissipação das tensões. Com relação ao ranqueamento de área envolvida nos ensaios, podemos notar claramente que o ensaio de quatro pontos envolve uma área maior a tensão, seguido pelo de três pontos e por último o biaxial. As figuras de 17 a 21 ilustram as distribuições de tensões nas amostras obtidas através do ensaio por elementos finitos.

No teste de três pontos pode-se notar uma área não homogênea de concentração de tensões logo abaixo do ponto de carregamento, na superfície de tensão, enquanto que no teste de quatro pontos essa área se mostrou maior, envolvendo toda a área superficial entre os pontos de carregamento, com tensão homogênea em toda sua extensão. Quanto ao teste biaxial, a concentração máxima de tensões ocorreu também de forma não homogênea, com tensão máxima ocorrendo logo abaixo do ponto de carregamento. Ocorreu uma eliminação total de tensões máximas nas bordas das amostras, sendo que em alguns casos, não houve tensão alguma nas bordas. O formato das amostras provavelmente favoreceu para que essa distribuição de tensões não chegasse até as bordas.

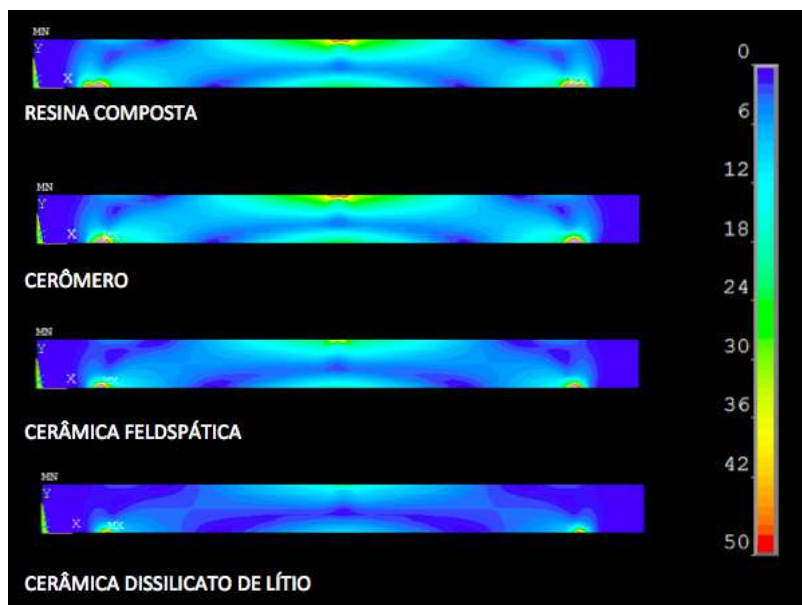


Figura 17. Vista lateral das amostras submetidas ao ensaio de três pontos.

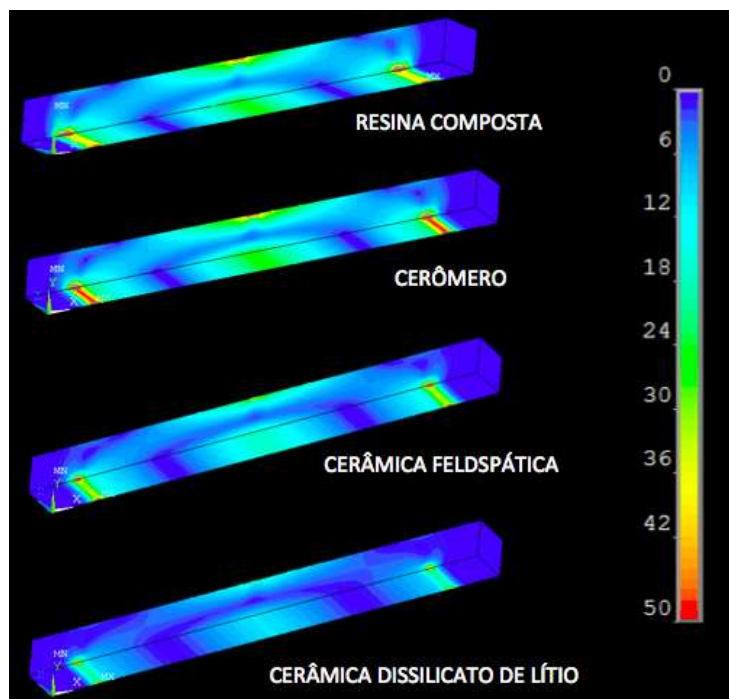


Figura 18. Vista inferior das amostras em três dimensões submetidas ao ensaio de três pontos.

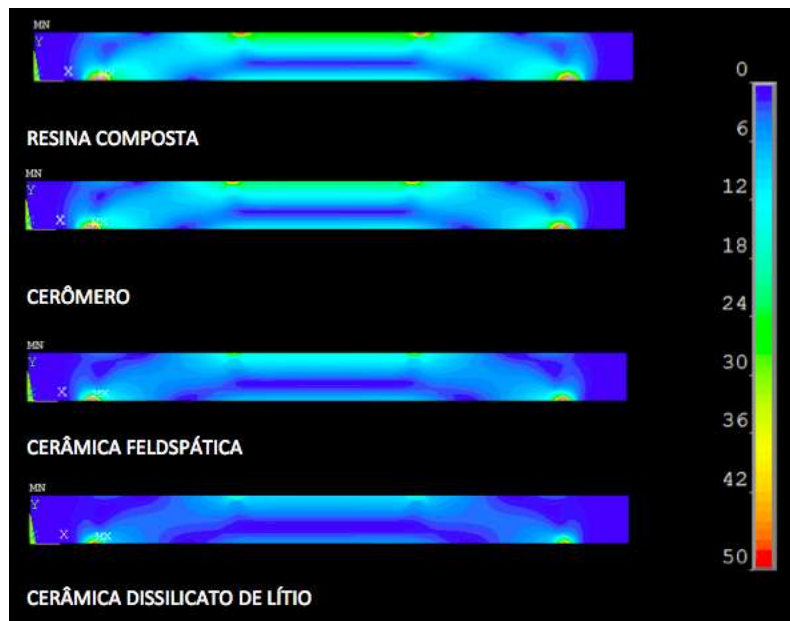


Figura 19. Vista lateral das amostras submetidas ao ensaio de quatro pontos.

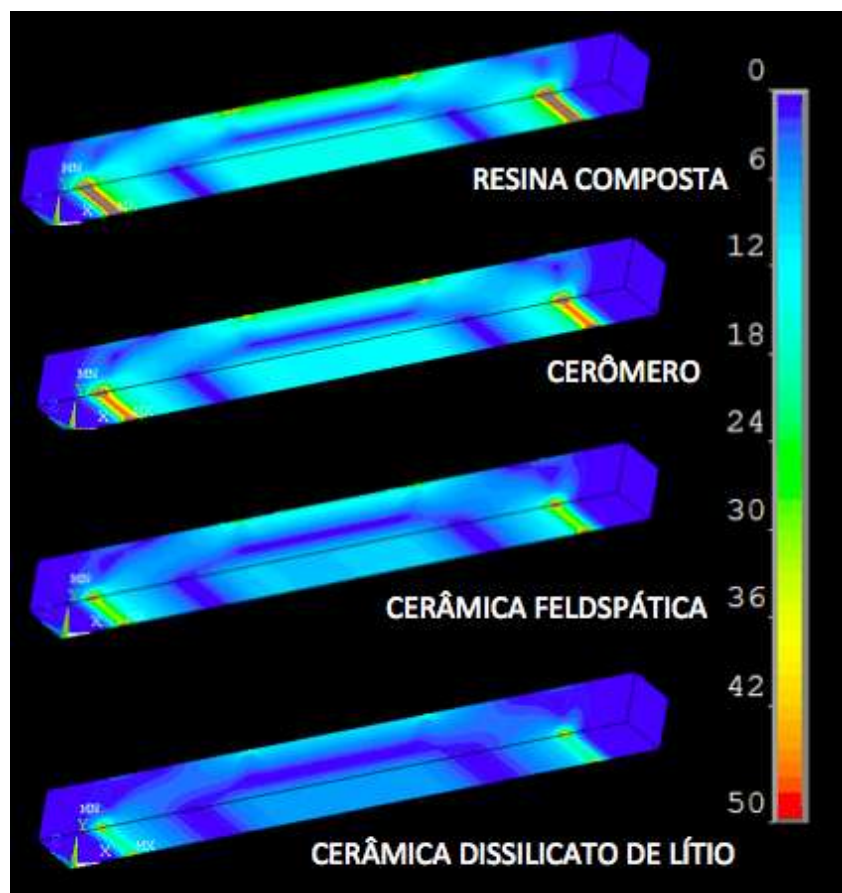


Figura 20. Vista inferior das amostras em três dimensões submetidas ao ensaio de quatro pontos.

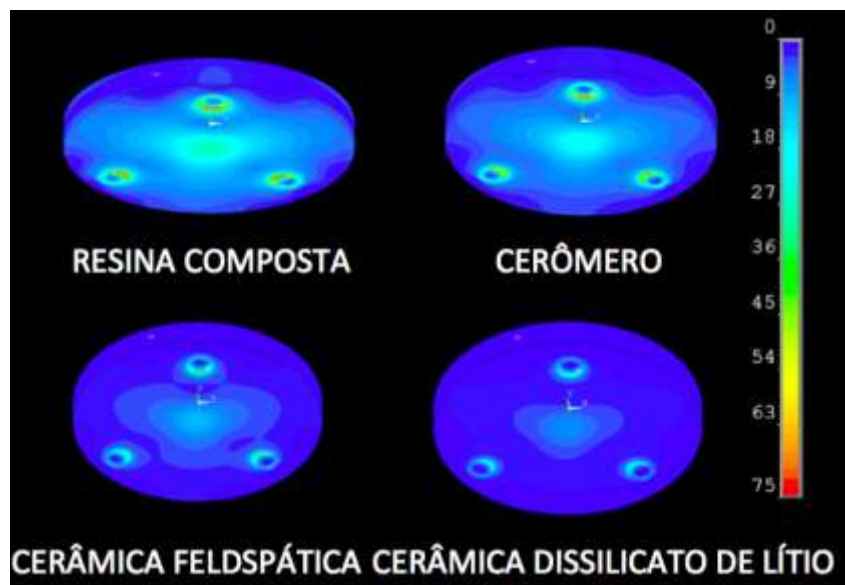


Figura 21. Vista inferior das amostras em três dimensões submetidas ao ensaio biaxial.

A avaliação das amostras após a fratura mostrou que nos ensaios de três e quatro pontos, geralmente, a falha resulta em dois fragmentos, enquanto no ensaio biaxial foram observados dois e três fragmentos em sua maioria e até quatro fragmentos em algumas amostras. Entre os ensaios de três e quatro pontos também foi observada diferença no local onde ocorre a falha conforme mostra a tabela 05. A maioria das amostras testadas no método de quatro pontos apresentou fratura deslocada de seu centro. A figura 22 mostra imagens de amostras em forma de barra, fraturadas próximo ao centro e deslocadas do centro e de amostras em forma de disco fraturadas em dois e em três fragmentos.

Tabela 05. Distribuição do local de fratura e da quantidade de fragmentos gerados para cada material em relação aos diferentes métodos de ensaio.

MATERIAL	GRUPO	MÉTODO	LOCAL DA FRATURA		NÚMERO DE FRAGMENTOS		
			CENTRO OU PRÓXIMO	DESLOCADO DO CENTRO	2	3	4
Resina composta	Z350-3	3 pontos	15	0	15	0	0
	Z350-4	4 pontos	6	9	15	0	0
	Z350-B	Biaxial	15	0	0	12	3
Cerômero	EPR-3	3 pontos	14	1	15	0	0
	EPR-4	4 pontos	3	12	14	1	0
	EPR-B	Biaxial	15	0	15	0	0
Cerâmica feldspática	NOR-3	3 pontos	15	0	15	0	0
	NOR-4	4 pontos	2	13	15	0	0
	NOR-B	Biaxial	15	0	9	6	0
Cerâmica reforçada	EMP-3	3 pontos	14	1	15	0	0
	EMP-4	4 pontos	2	13	15	0	0
	EMP-B	Biaxial	15	0	5	10	0

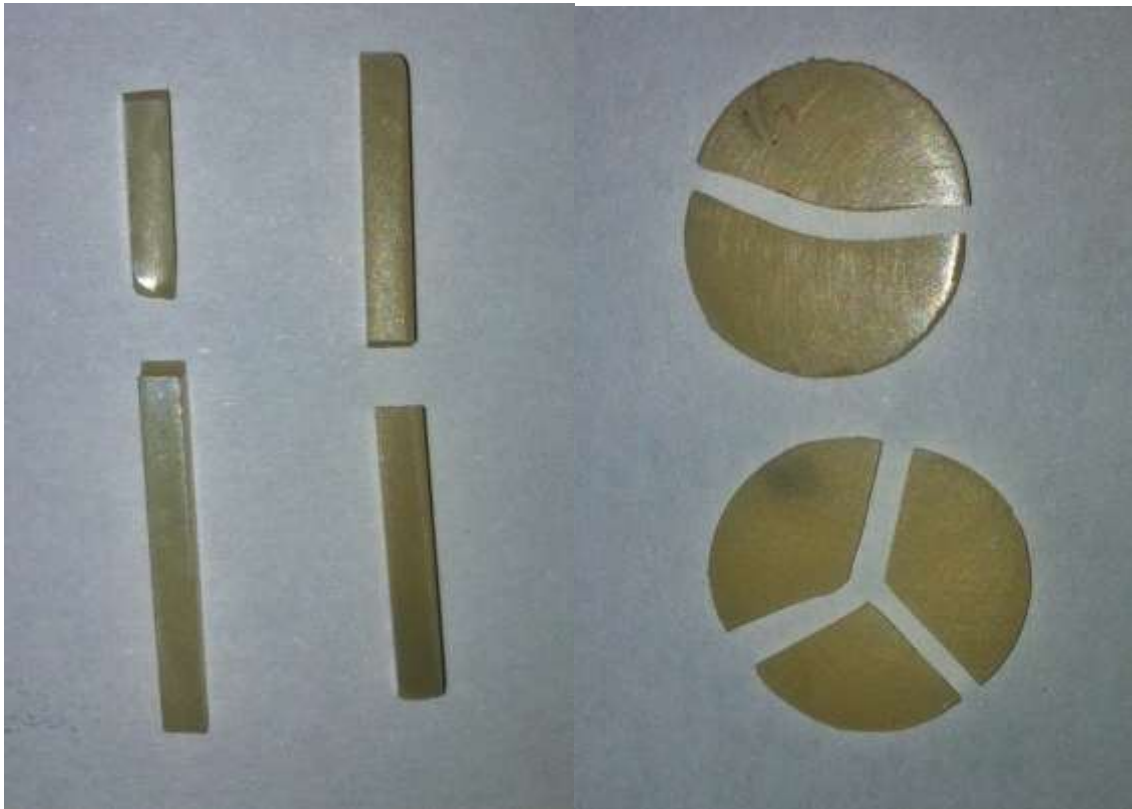


Figura 22. Imagens de amostras em forma de barra fraturadas fora do centro (esq.) no centro (dir.) e em forma de disco fraturadas em dois fragmentos (acima) e em três fragmentos (abaixo).

6 - DISCUSSÃO

Resistência flexural (RF) é definida como a propriedade de um material em resistir às forças que provocam a sua curvatura, sem fraturar (Dauvillier et al., 2000; Walker et al. 2006) e deve resultar em altos valores sem que para isso haja excessiva deformação (Cecchin et al., 2007). Essa resistência combina forças de compressão e de tração e tem sido mensurada por meio de ensaios de três pontos, ensaios de quatro pontos ou ensaios biaxiais (Suansuwan & Swain, 2001; Lohbauer et al., 2003; Guazzato et al., 2004; Yilmaz et al., 2007; Pick et al. 2010; Fischer et al., 2008).

Como é uma propriedade elástica, seus valores são dependentes da composição, inerente a cada material, e não deveriam apresentar variações quando um mesmo material é avaliado por métodos diferentes. Como os resultados do presente trabalho indicaram, para os valores de RF, diferenças estatísticas significantes entre diferentes materiais, dentro do mesmo método e entre o mesmo material, avaliado por diferentes métodos, as hipóteses nulas foram rejeitadas.

Pode-se afirmar que há uma correlação positiva entre propriedades mecânicas e fração de volume de cargas (Kim et al., 1994, 2002). A morfologia e o tamanho das partículas de carga de um material influenciam a sua resistência, pois afetam o volume de carga (Kim et al., 1994, 2002). Compósitos com maiores desses volumes devem ser mais resistentes do que aqueles com menores volumes (Kim et al., 2002). Os diferentes valores de RF apresentados pelos materiais testados estão diretamente ligados às suas composições e parcialmente ligados à forma de obtenção das amostras. Os materiais resinosos Filtek Z350 e Epricord possuem matriz de mesma natureza, mas com diferenças de tamanho e quantidade de carga inorgânica. Estando na categoria dos cerômeros, cuja composição e forma de polimerização foram modificadas para melhorar suas propriedades, era de se esperar valores de RF significativamente superiores para o Epricord em comparação com a resina Filtek Z350. Entretanto, independente do método, a RF da resina Filtek Z350 foi significativamente superior. Isso pode ocorrer devido à forma de polimerização, a qual foi a única diferença na obtenção das

amostras dos dois grupos. Na comparação da cerâmica feldspática com a resina Filtek Z350, a menor RF apresentada pela cerâmica é provavelmente devido à sua friabilidade. Materiais com essa propriedade concentram as tensões sem se deformar, e, uma vez superado seu limite de resistência, a fratura ocorre de forma abrupta. Para as resinas, devido à sua origem polimérica, sua resiliência permite maior deformação elástica antes da fratura. Os maiores valores de RF da cerâmica feldspática em relação ao Epricord reforça a possibilidade de falha na polimerização do cerômero. Por outro lado, esse material poderia realmente apresentar deficiência em composição, visto que apresentou menores valores de RF em todos os ensaios, não sendo estatisticamente significante apenas no ensaio de quatro pontos. Entre as cerâmicas, os resultados mostraram de forma evidente a importância das partículas de dissilicato de lítio na resistência flexural da cerâmica. Nesse mecanismo, uma vez iniciada a fratura, sua propagação fica dificultada pela presença das partículas de reforço.

Vários são os fatores que podem influenciar o resultado em um ensaio de flexão: parâmetros estruturais, como a inclusão de vazios e rachaduras (Rodrigues Júnior et al, 2008), falhas na superfície ou dentro do volume, dimensões dos espécimes, gradientes e o estado de tensão (Ban & Anusavice, 1990). Além disso, o efeito da geometria (Alshehri, 2011), a forma e o tamanho da amostra e as condições de instalação do ensaio (Jin et al., 2004) podem influenciar fortemente os resultados dos ensaios de resistência. Defeitos de superfície foram identificados como sendo sítios de iniciação de fraturas em 86.6% a 96.6% dos espécimes (Rodrigues et al., 2008). A influência de muitos desses fatores pode ser eliminada ou reduzida seguindo as normas ISO 4049 (2000) para os ensaios de três e quatro pontos e as normas ISO 6872 (2008) para o ensaio biaxial. Nessas normas, a questão da amostragem é normalmente abordada, seguido pelas seções sobre métodos de ensaio. Essas seções metodológicas vitais descrevem exatamente como corpos de prova devem ser fabricados, seguido por procedimentos de medida exata, incluindo o equipamento necessário (muitas vezes ilustrado com diagramas), controle de parâmetros ambientais, número (n) de medições

repetidas e o tratamento dos resultados (Della Bona et al., 2011).

Partindo-se do princípio de que as propriedades de um material são constantes, uma vez obtidas as amostras e os ensaios desenvolvidos adequadamente, não deveriam haver diferenças nos resultados obtidos a partir de métodos diferentes. Como é impossível obter amostras sem imperfeições e executar perfeitamente qualquer método laboratorial, dever-se-ia utilizar aquele de melhor domínio e menos sujeito a interferências técnicas. No presente trabalho, os resultados estatisticamente semelhantes entre os ensaios de três pontos e biaxial foram superiores ao ensaio de quatro pontos. A maioria dos trabalhos associa essa situação à maior área sujeita a tensão no ensaio de quatro pontos, envolvendo maior número de defeitos estruturais, a partir dos quais se iniciaria a fratura (Chung et al., 2004; Fischer et al., 2008; Rodrigues et al. 2008; Pick et al., 2010), com consequente redução na RF. Científica e clinicamente, essa condição pode ser vista como vantagem, por indicar maior probabilidade de falha a partir dos defeitos estruturais, comuns em restaurações. Os valores de RF resultantes do ensaio de quatro pontos, por associar propriedades inerentes ao material e defeitos de fabricação, poderiam ser considerados valores mínimos de referência para o material testado. Porém, um detalhe técnico do ensaio de quatro pontos deve ser observado com cuidado. Os 2 pontos de carga devem estar equidistantes dos pontos de apoio e tocar simultaneamente a superfície da amostra de forma que a tensão gerada entre os pontos de carga seja uniforme conforme mostra a análise por elementos finitos (Figuras 19 e 20). Se um dos pontos de carga gerar mais tensão os resultados podem ser negativamente influenciados.

Devido às grandes dimensões normatizadas para as amostras dos ensaios de três e quatro pontos, de 25x2x2 mm, fotopolimerizações múltiplas sobrepostas são necessárias para polimerizar o material, podendo resultar em falta de homogeneidade, com maior grau de polimerização nas regiões superpostas em comparação com a região adjacente (Dionysopoulus, 1994; Mehl et al., 1997; Palin et al., 2003). Assim, as falhas poderiam ocorrer nas áreas onde foi menor o grau de polimerização. Além disso, no comprimento recomendado, é tecnicamente difícil preparar espécimes isentas de

imperfeições e é necessário acabamento nas quatro faces das amostras para padronização das superfícies e redução de defeitos superficiais e de borda, os quais poderiam servir como pontos de origem da falha. Nos três aspectos, parece haver vantagem para o ensaio biaxial por que: (1) as dimensões reduzidas dos discos permitem uma única polimerização, como afirmado por Fisher et al. (2008) e Ban & Anusavice (1990); (2) o menor volume resulta em menor risco de falhas estruturais; (3) os discos necessitam de acabamento somente nas superfícies superior e inferior e eventuais defeitos de borda parecem não ter efeito por não participarem diretamente no processo carga/tensão (Anusavice et al., 2007; Fisher et al., 2008). Conforme estabelecido por Nakamura et al. (2010), a resistência flexural decresce com o aumento da rugosidade de superfície. Além disso, amostras com volume e dimensões menores estão mais próximas das condições clínicas (Ban & Anusavice, 1990; Palin et al., 2003; Chung et al., 2004). O diâmetro de 12mm das amostras para o ensaio biaxial no presente estudo foi definido visando a uniformidade da polimerização, uma vez que a ponta de saída de luz da unidade polimerizadora possuía esse diâmetro, resultando em melhor confiabilidade experimental (Palin et al., 2003).

A análise por elementos finitos mostrou as diferenças na distribuição de tensões de tração entre os grupos. No ensaio de três pontos, em comparação com o de quatro pontos, observa-se maior tensão de tração concentrada em menor área, localizada abaixo do ponto de carga, compatível com as características do ensaio mecânico para os dois ensaios e com a composição de cada material, sendo a concentração de tensões abaixo do local de carga maior para os materiais resinosos. No ensaio flexural de quatro pontos, há uma tensão e um campo de tensão uniforme ao longo da superfície da amostra, não havendo concentração de tensão junto aos pontos de carregamento (Fischer et al., 2008). Há uma flexão entre os suportes internos levando ao desenvolvimento de níveis inferiores de cisalhamento na região (Wen et al., 1999) e, dessa forma, o estado de tensão dos ensaios de quatro pontos é mais próximo de uma flexão pura, como ocorre no ensaio biaxial (Wen et al., 1999). Como a maior parte da amostra está sob tensão constante, os resultados são

mais representativos das propriedades do material (Ban & Anusavice, 1990). Apesar de algumas vantagens potenciais, os desvios médios dos resultados dos ensaios de flexão de quatro pontos são maiores que os dos ensaios de flexão de três pontos (Ban & Anusavice, 1990). Nas imagens das amostras do ensaio biaxial as tensões estão distribuídas em toda a área entre os pontos de apoio, com maior concentração na região oposta ao ponto de carga, não havendo tensões nas bordas, conforme relatos de outros trabalhos (Abu-Hassan et al., 1998; Wen et al., 1999; Fischer et al., 2008). Devido a essas características, o ensaio biaxial pode produzir menos variação nos dados obtidos (Wen et al., 1999).

Em qualquer situação espera-se que a falha por fratura ocorra nas áreas de maior concentração de tensões. Isso foi comprovado na avaliação do local da fratura nas amostras após o ensaio mecânico conforme descrito na tabela 5. Nas amostras do ensaio de três pontos, independente do material, a maioria das fraturas ocorreu no centro da amostra, na área abaixo do ponto de carga, estando de acordo com relatos de outros estudos (Rodrigues Júnior et al., 2008; Fischer et al., 2008). No ensaio de quatro pontos todas as fraturas ocorreram dentro da área sob tensão de tração, mas a maioria ocorreu deslocada do centro da amostra. De acordo com o observado no ensaio por elementos finitos, os ensaios de três pontos e o de quatro pontos submetem volumes diferentes do material testado a tensões, sendo o volume maior para o de quatro pontos. Isso leva a uma ocorrência de fraturas em diferentes locais ao longo da superfície tensionada, na área entre os dois pontos de carga (Rodrigues Júnior et al., 2008). Quase todas as amostras, com exceção de uma, dos ensaios mecânicos de três e quatro pontos apresentaram fratura com dois fragmentos. Porém, nas amostras do ensaio biaxial, em decorrência da distribuição das tensões, as fraturas ocorreram em diferentes direções e, na maioria, em três ou mais fragmentos. De uma forma ou de outra, todas as falhas ocorreram em locais onde, de acordo com os resultados do ensaio por elementos finitos, haviam concentrações de tensões, o que mostra uma correspondência dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos com os do ensaio por elementos finitos.

Ensaaios *in vitro* são limitados, pois nesses casos, não incluem a influencia da fadiga e a cavidade oral não é considerada. Esses ensaios são apenas o primeiro passo para predizer o desempenho clínico de materiais dentários (Yilmaz et al., 2007). Ademais, para realização do ensaio por elementos finitos, os materiais foram considerados lineares, homogêneos e elásticos, propriedades que na prática não são totalmente realidade. Os valores médios de resistência à flexão também variam de acordo com o método e ambiente de teste. Além disso, as normas não são projetadas para estabelecer qual é o material com 'melhor desempenho' para uma determinada aplicação clínica. No nível mais baixo, eles são projetados para excluir materiais inseguros e de fraco desempenho do mercado (Della Bona et al., 2011). O uso de protocolos padronizados, tais como os utilizados nesse trabalho, permite que os resultados de diferentes estudos sejam comparados. Embora sempre existam limitações ao extrapolar os resultados laboratoriais para o desempenho clínico de materiais, a caracterização de materiais *in vitro* deve incluir um método de ensaio capaz de acessar sua resistência (Pick et al. (2010).

No presente trabalho os resultados indicaram a confiabilidade dos ensaios ao apresentarem resultados superiores para os materiais cuja composição aumenta as propriedades mecânicas, com maior sensibilidade para os ensaios de três pontos e biaxial. Todos os ensaios apresentaram razoáveis valores de coeficiente de variação indicando boa execução do método. Além disso, a nítida correlação dos ensaios mecânicos com a análise por elementos finitos e o local de fratura permite confiabilidade na interpretação dos resultados. Por outro lado, seria interessante que pesquisas futuras comparassem as diferentes velocidades nas quais podem ser empregadas nos testes ou a influencia de ciclagem térmica ou mecânica para verificação da possibilidade de existência de variações nos resultados apresentados por essas diferentes variáveis.

7 - CONCLUSÃO:

A composição dos materiais influencia em sua resistência flexural.

Todos os métodos se mostraram confiáveis.

O método experimental de resistência flexural de quatro pontos se mostrou menos sensível e menos reprodutível que o de três pontos e o biaxial.

O cerômero Epricord possui a menor resistência flexural dos materiais, provavelmente devido a sua composição.

Há correspondência entre o ensaio por elementos finitos e os ensaios mecânicos, uma vez que os padrões de fratura observados são coincidentes com as áreas de maior tensão mostradas pelo ensaio por elementos finitos.

REFERÊNCIAS:

Abu-Hassan MI, Abu-Hammad OA, Harrison A. Strains and tensile stress distribution in loaded disc-shaped ceramic specimens. An FEA study. **J Oral Rehabil.** 1998 Jul;25(7):490-5.

Albakry M, Guazzato M, Swain MV. Biaxial flexural strength, elastic moduli, and x-ray diffraction characterization of three pressable all-ceramic materials. **J Prosthet Dent.** 2003;89:374-80.

Alshehri SA. An investigation into the role of core porcelain thickness and lamination in determining the flexural strength of In-Ceram dental materials. **J Prosthodont.** 2011 Jun;20(4):261-6.

Anusavice KJ, Kakar K, Ferree N. Which mechanical and physical testing methods are relevant for predicting the clinical performance of ceramic-based dental prostheses? **Clin Oral Implants Res.** 2007 Jun;18 Suppl 3:218-31.

Asmussen E, Peutzfeldt A, Sahafi A: Finite element analysis of stresses in endodontically treated, dowel-restored teeth. **J Prosthet Dent.** 2005;94:321-329.

Ban S, Anusavice KJ. Influence of test method on failure stress of brittle dental materials. **J Dent Res.** 1990 Dec;69(12):1791-9.

Borba M, Della Bona A, Cecchetti D. Flexural strength and hardness of direct and indirect composites. **Braz Oral Res.** 2009 Jan-Mar;23(1):5-10.

Campos RE, Soares CJ, Quagliatto PS, Soares PV, de Oliveira OB Jr, Santos-Filho PC, Salazar-Marcho SM. In vitro study of fracture load and fracture pattern of ceramic crowns: a finite element and fractography analysis. **J Prosthodont.** 2011 Aug;20(6):447-55.

□□□□□□ D, □□□□□□ AP, □□□□□ F, □□□□□□□□ DS, □□□□□□□□□□ A, □□□□□□□□□□□□□□ C. Resistência flexural de pinos de fibra de vidro, pinos de fibra de carbono recobertos por fibra de vidro e pinos de fibra de carbono. **Rev Acad Odontol.** 2007 May-Aug;□□(□)□□□□□.

Chitchumnong P, Brooks SC, Stafford GD. Comparison of three- and four-point flexural strength testing of denture-base polymers. **Dent Mater.** 1989

Jan;5(1):2-5.

Chung SM, Yap AU, Chandra SP, Lim CT. Flexural strength of dental composite restoratives: comparison of biaxial and three-point bending test. **J Biomed Mater Res B Appl Biomater**. 2004 Nov 15;71(2):278-83.

Combe EC, Shaglouf AM, Watts DC, Wilson NH. Mechanical properties of direct core build-up materials. **Dent Mater**. 1999 May;15(3):158-65.

Curtis AR, Palin WM, Fleming GJ, Shortall AC, Marquis PM. The mechanical properties of nanofilled resin-based composites: the impact of dry and wet cyclic pre-loading on bi-axial flexure strength. **Dent Mater**. 2009 Feb;25(2):188-97.

da Rosa Rodolpho PA, Cenci MS, Donassollo TA, Loguércio AD, Demarco FF. A clinical evaluation of posterior composite restorations: 17-year findings. **J Dent**. 2006 Aug;34(7):427-35.

Dauvillier BS, Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL. Visco-elastic parameters of dental restorative materials during setting. **J Dent Res**. 2000 Mar;79(3):818-23.

DeHoff PH, Anusavice KJ, Hathcock PW. An evaluation of the four-point flexural test for metal-ceramic bond strength. **J Dent Res**. 1982 Sep;61(9):1066-9.

Della Bona A, Shen C, Anusavice KJ. Work of adhesion of resin on treated lithia disilicate-based ceramic. **Dent Mater**. 2004 May;20(4):338-44.

Della Bona A, Wozniak WT, Watts DC. International dental standards--order out of chaos? **Dent Mater**. 2011 Jul;27(7):619-21.

Dionysopoulos P. The effect of secondary curing on flexural strength of composite resin. **Odontostomatol Proodos**. 1994;48:19-23

Fischer H, Dautzenberg G, Marx R. Nondestructive estimation of the strength of dental ceramic materials. **Dent Mater**. 2001 Jul;17(4):289-95.

Fischer J, Stawarczyk B, Hämmerle CH. Flexural strength of veneering ceramics for zirconia. **J Dent**. 2008 May;36(5):316-21.

Fleming GJ, Shaini FJ, Marquis PM. An assessment of the influence of mixing induced variability on the bi-axial flexure strength of dentine porcelain

discs and the implications for laboratory testing of porcelain specimens. **Dent Mater.** 2000 Mar;16(2):114-9.

Fleming GJ, Shelton RM, Marquis PM. The influence of clinically induced variability on the bi-axial fracture strength of cemented aluminous core porcelain discs. **Dent Mater.** 1999 Jan;15(1):62-70.

Fleming GJ, Narayan O. The effect of cement type and mixing on the bi-axial fracture strength of cemented aluminous core porcelain discs. **Dent Mater.** 2003 Jan;19(1):69-76.

Franco LL. **Avaliação da resistência a flexão, dureza e grau de conversão de compósitos para técnica indireta em função da cor.** [dissertação] São Paulo: Faculdade de Odontologia/USP; 2005.

Gonzaga CC, César PF, Okada CY; Fredericci C, Neto FB, Yoshimura HN. Mechanical properties and porosity of dental glass-ceramics hot-pressed at different temperatures. **Mater Research.** 2008;11(3):301-6.

Guazzato M, Albakry M, Ringer SP, Swain MV. Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic materials. Part I. Pressable and alumina glass-infiltrated ceramics. **Dent Mater.** 2004 Jun;20(5):441-8.

Hammant B. The use of 4-point loading tests to determine mechanical properties. **Composites.** 1971 Dec;2(4):246-9.

Hirata M, Koizumi H, Tanoue N, Ogino T, Murakami M, Matsumura H. Influence of laboratory light sources on the wear characteristics of indirect composites. **Dent Mater J.** 2011;30(2):127-35.

Hooshmand T, Parvizi S, Keshvad A. Effect of surface acid etching on the biaxial flexural strength of two hot-pressed glass ceramics. **J Prosthodont.** 2008 Jul;17(5):415-9.

Huang CW, Hsueh CH. Piston-on-three-ball versus piston-on-ring in evaluating the biaxial strength of dental ceramics. **Dent Mater.** 2011 Jun;27(6):e117-23.

ISO 4049. Dentistry - polymer based filling, restorative and luting materials. Geneva, Switzerland: **International Organization for Standardization**; 2000.

ISO 6872. Dentistry - dental ceramics. **International Organization for Standardization**; 2008.

Izumida A, Yoda M, Inagaki R, Toyoda J, Ishibashi M, Kasahara S, Kimura K. Mechanical properties of hard resins for crowns and bridges. **Nihon Hotetsu Shika Gakkai Zasshi**. 2008 Oct;52(4):521-8.

Jin J, Takahashi H, Iwasaki N. Effect of test method on flexural strength of recent dental ceramics. **Dent Mater J**. 2004 Dec;23(4):490-6.

Jorge RM. **Rugosidade de superfície e resistência flexural do IPS Empress 2 submetida a seis tratamentos de superfície**. [dissertação] Curitiba: Faculdade de Odontologia/PUC-PR; 2007.

Joshi S, Mukherjee A, Kheur M, Mehta A. Mechanical performance of endodontically treated teeth. **Finite Elements in Analysis and Design** 2001;37:587-601.

Kim KH, Ong JL, Okuno O. The effect of filler loading and morphology on the mechanical properties of contemporary composites. **J Prosthet Dent**. 2002 Jun;87(6):642-9.

Kim KH, Park JH, Imai Y, Kishi T. Microfracture mechanisms of dental resin composites containing spherically-shaped filler particles. **J Dent Res**. 1994 Feb;73(2):499-504.

Klapdohr S, Moszner N. New inorganic components for dental filling composites. **Monatsh Chem** 2005;136(1):21–45.

Kusy RP, Dilley GJ. Elastic modulus of a triple-stranded stainless steel arch wire via three- and four-point bending. **J Dent Res**. 1984 Oct;63(10):1232-40.

Lin J, Shinya A, Gomi H, Shinya A. Finite element analysis to compare stress distribution of connector of lithia disilicate-reinforced glass-ceramic and zirconia-based fixed partial denture. **Odontology**. 2011 Jun 21.

Lohbauer U, von der Horst T, Frankenberger R, Krämer N, Petschelt A. Flexural fatigue behavior of resin composite dental restoratives. **Dent Mater**. 2003 Jul;19(5):435-40.

Mehl A, Hickel R, Kunzelmann KH. Physical properties and gap formation of light-cured composites with and without 'softstart-polymerization'. **J**

Dent. 1997 May-Jul;25(3-4):321-30.

Monteiro GQM, Montes MAJR. Evaluation of Linear Polymerization Shrinkage, Flexural Strength and Modulus of Elasticity of Dental Composites.

Materials Research. 2010; 13(1): 51-55.

Nakamura Y, Hojo S, Sato H. The effect of surface roughness on the Weibull distribution of porcelain strength. **Dent Mater J.** 2010 Jan;29(1):30-4.

Oliva EA. **Influência do método de processamento, sinterização convencional ou injeção a vácuo, na resistência à flexão e dureza de porcelanas feldspáticas.** [tese] Araraquara: Faculdade de Odontologia/Unesp; 2006.

Paes AT. Por dentro da estatística. **einstein: Educ Contin Saúde.** 2008; 6(4 Suppl 2): 153-4.

Palin WM, Fleming GJ, Burke FJ, Marquis PM, Randall RC. The reliability in flexural strength testing of a novel dental composite. **J Dent.** 2003 Nov;31(8):549-57.

Pelaez-Vargas A, Dussan JA, Restrepo-Tamayo LF, Paucar C, Ferreira JA, Monteiro FJ. The effect of slurry preparation methods on biaxial flexural strength of dental porcelain. **J Prosthet Dent.** 2011;105:308-314.

Piccioni MARV. **Avaliação da resistência à flexão e determinação das propriedades mecânicas de resinas compostas e sua aplicação no método dos elementos finitos.** [dissertação] Araraquara: Faculdade de Odontologia/Unesp; 2010.

Pick B, Meira JB, Driemeier L, Braga RR. A critical view on biaxial and short-beam uniaxial flexural strength tests applied to resin composites using Weibull, fractographic and finite element analyses. **Dent Mater.** 2010 Jan;26(1):83-90.

Rodrigues SA Jr, Ferracane JL, Della Bona A. Flexural strength and Weibull analysis of a microhybrid and a nanofill composite evaluated by 3- and 4-point bending tests. **Dent Mater.** 2008 Mar;24(3):426-31.

Salgado NRGF. **Influência do pré-aquecimento e de diferentes regimes de fotoativação na adaptação marginal, grau de conversão e propriedades mecânicas de um compósito nanoparticulado.** [tese] São

Paulo: Faculdade de Odontologia/USP; 2008.

Schalch MV. **Resistência à flexão, resistência à tração diametral e dureza de sistemas cerâmicos para infra-estrutura.** [dissertação] Araraquara: Faculdade de Odontologia/Unesp; 2003.

Shetty DK, Rosenfield AR, Duckworth WH, Held PR. A biaxial-flexure test for evaluating ceramic strengths. **J Am Ceram Soc.** 1983; jan 66:36–42.

Soares PV, Santos-Filho PC, Gomide HA, Araujo CA, Martins LR, Soares CJ. Influence of restorative technique on the biomechanical behavior of endodontically treated maxillary premolars. Part II: strain measurement and stress distribution. **J Prosthet Dent.** 2008 Feb;99(2):114-22.

Suansuwan N, Swain MV. Determination of elastic properties of metal alloys and dental porcelains. **J Oral Rehabil.** 2001 Feb;28(2):133-9.

Van Nieuwenhuysen JP, D'Hoore W, Carvalho J, Qvist V. Long-term evaluation of extensive restorations in permanent teeth. **J Dent.** 2003 Aug;31(6):395-405.

Walker MP, Haj-Ali R, Wang Y, Hunziker D, Williams KB. Influence of environmental conditions on dental composite flexural properties. **Dent Mater.** 2006 Nov;22(11):1002-7.

Wen MY, Mueller HJ, Chai J, Wozniak WT. Comparative mechanical property characterization of 3 all-ceramic core materials. **Int J Prosthodont.** 1999 Nov-Dec;12(6):534-41.

Yap AU, Teoh SH. Comparison of flexural properties of composite restoratives using the ISO and mini-flexural tests. **J Oral Rehabil.** 2003 Feb;30(2):171-7.

Yilmaz H, Aydin C, Gul BE. Flexural strength and fracture toughness of dental core ceramics. **J Prosthet Dent.** 2007 Aug;98(2):120-8.