

Artigo resumido da Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, de Sergio Pietro La Croix, defendida em 24 de julho de 1998, na COPPE - UFRJ.

PRENSAGEM UNIAXIAL DE CERÂMICA DENTAL

La Croix, Sergio Pietro *M.Sc. Metalurgia e Materiais, COPPE - UFRJ*

João, Mário *Ph.D. Prof. Diretor da Faculdade de Odontologia UGF*

Nóbrega, Maria Cecília *D.Sc. Metalurgia e Materiais, COPPE - UFRJ*

SINOPSE

Foi desenvolvido um novo processamento de cerâmica dental, através de uma etapa de prensagem uniaxial, com objetivos de aumentar a tenacidade à fratura do material cerâmico, quando utilizado em prótese dental toda cerâmica, padronizar e simplificar as etapas de conformação e condensação no seu procedimento de execução. Está apoiado no uso de um líquido aditivo ligante, substituindo a água do processo convencional. Foi comprovado um aumento significativo de tenacidade à fratura do produto cerâmico prensado, quando comparado com os produtos cerâmicos obtidos pelo processo convencional.

ABSTRACT

Was developed a new dental ceramic processing, through an uniaxial pressing step, with objectives of fracture toughness enhance of ceramic material, when used to all-ceramic restoration, standard and simplify the conformation and condensation steps in your execution procedures. It's supported on the use of a binder additive liquid, replacing the water from the conventional process. Was confirmed a significant enhance of fracture toughness of pressing ceramic product, when compared with the ceramic product obtained from dental conventional process.

1. INTRODUÇÃO

Uma evolução irreversível nas técnicas de restauração dental vem sendo estabelecida pelo uso de materiais cerâmicos e compósitos. Esses novos materiais apresentam vantagens relativas, devidas ao ótimo desempenho das suas propriedades funcionais. Principalmente, estética, biocompatibilidade, resistência química e redução do peso das próteses (1). A tendência das técnicas de cerâmica dental é eliminar a subestrutura metálica das próteses, utilizando cerâmicas de maior tenacidade à fratura. Desse modo, busca-se resolver o problema de friabilidade, observado nas restaurações dentais feitas inteiramente de material cerâmico. Os processos de execução podem ser realizados pelo modo convencional de escultura da massa cerâmica, ou por alguns processos avançados já existentes, que utilizam os mais variados métodos de conformação. Métodos como centrifugação de cerâmica fundida, usinagem de um bloco cerâmico, cerâmica infiltrada e modelagem de cerâmica sob pressão a quente, têm sido propostos. Entretanto, por utilizar equipamentos especiais de processamento, apresentam um alto custo de aquisição, o que resulta no custo elevado da prótese cerâmica para o cliente final. O presente trabalho introduz um novo e simples método de obtenção de uma restauração dental toda cerâmica, pelo uso de um processo de prensagem uniaxial. A utilização de um líquido aditivo, adicionado ao pó cerâmico, viabiliza uma etapa de prensagem da massa cerâmica formada (2). Desse modo busca-se suprir a necessidade do emprego de equipamentos sofisticados, o que pode reduzir os custos de aquisição de informação e tecnologia, e o custo final de uma prótese toda cerâmica.

2. REVISTA BIBLIOGRÁFICA

2.1- CARACTERIZAÇÃO DA CERÂMICA DENTAL

Desde a introdução do sistema de porcelana fundida sobre metal, no início da década de sessenta, a demanda pela cerâmica como material de restauração dental vem crescendo (3). Estimativas de 1990 indicam que 70% das coroas dentais restaurativas, colocadas por dentistas privados, têm porcelana como um dos seus componentes (3). Esta popularidade pode ser resultado da excelente qualidade estética obtida pela porcelana.

A porcelana dental é o material sintético que mais se aproxima da aparência natural do dente. É disponível em ampla faixa de sombras e translucências, para obter naturalidade da restauração dental. Entretanto, a friabilidade característica dos materiais cerâmicos entra como fator de limitação. Defeitos de fabricação e trincas de superfície devem ser evitados para minimizar os mecanismos de falha clínica das próteses totalmente cerâmicas.

As cerâmicas dentais podem ser classificadas pelo tipo (porcelana feldspática, porcelana reforçada com leucita, porcelana aluminosa, de alumina, de alumina infiltrada com fase vítrea, de espinélio infiltrado com vidro e vitro-cerâmicas), pelo uso (em dentaduras, restaurações metal-cerâmica, blocos, coroas e pontes), pelo método de processamento (sinterização, consolidação por fluxo viscoso e usinagem), ou pelo material do núcleo (metal fundido, metal forjado, vitro-cerâmica, cerâmica aluminosa, de alumina e a cerâmica para o sistema CAD-CAM (computer aided design - computer aided manufacture)) (1). Os métodos de fabricação de restaurações cerâmicas incluem condensação e sinterização, modelagem sob pressão e sinterização, colagem em modelo de gesso e sinterização, infiltração vítrea e sinterização, e por usinagem controlada por computador. As unidades simples de coroas podem ser uma coroa metal-cerâmica, coroa de jaqueta de porcelana pura, baseada em um núcleo de porcelana aluminosa, ou nas mais recentes coroas de jaqueta cerâmica, baseada em núcleo de porcelana reforçada com leucita, obtida por injeção, alumina modelada por prensagem, alumina infiltrada com vidro, ou vitro-cerâmica centrifugada a partir de vidro fundido (1).

A tecnologia das cerâmicas dentais é uma das áreas de mais rápido crescimento em pesquisa e desenvolvimento de materiais dentais. Essas cerâmicas avançadas representam uma significativa evolução entre as técnicas de restauração dental. O emprego deste material na odontologia ocorre principalmente em implantes, coroas unitárias, próteses parciais fixas, blocos e laminados de aparência na bateria labial (1). O bom desempenho das propriedades requeridas para este material dental alcança estética refinada e acuracidade dentro dos mais exigentes padrões de aceitação clínica (4). As principais marcas de porcelanas encontradas no mercado dental são Vita, Ceramco, Creation, Duceram, Crystar, Noritach e outras.

O sucesso na construção dos dentes com cerâmicas, além das características estéticas, está relacionado com a alta resistência à degradação química deste material, no agressivo meio bucal. Resultando em próteses duráveis, biocompatíveis e resistentes ao ataque microbiano e variações de pH (4). O material base da porcelana dental é a sílica (SiO_2), que pode existir na forma cristalina como o quartzo, cristobalita e tridimita, ou como um vidro amorfo chamado sílica fundida. As propriedades das cerâmicas são afetadas pelos tipos de cristais formados na sua micro-estrutura e pela quantidade de crescimento dos grãos (1).

A porcelana dental é um material composto de fases heterogêneas. Apresenta uma fase cristalina e outra fase vítrea ao seu redor. A maioria das cerâmicas dentais possui o composto mineral feldspato, formado pelo óxido de potássio (K_2O), alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2). O feldspato, quando misturado com vários outros óxidos metálicos e queimado na alta temperatura, pode dar origem a uma fase cristalina chamada leucita, juntamente com uma outra fase vítrea líquida, denominada fase eutética. Esta fase promove a coalescência das partículas do pó cerâmico quando sinterizadas no estado sólido. Isto é, a fase líquida envolve as partículas remanescentes, formando um sólido denso através de um processo que é chamado de sinterização por fase líquida.

Ao iniciar o resfriamento das porcelanas feldspáticas, ocorrem trocas iônicas entre os átomos dos diferentes elementos colocados em contato. Essas trocas vão ocasionar um rearranjo eletrônico, buscando a eletro-neutralidade do material, até atingir seu nível de energia interna mínimo, ou energia de equilíbrio. A partir do núcleo formado, este novo arranjo promove o crescimento dos grãos do mineral cristalino chamado leucita ($\text{K}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 4\text{SiO}_2$), originando a fase cristalina, a qual pode ser identificada no diagrama ternário da figura 1.

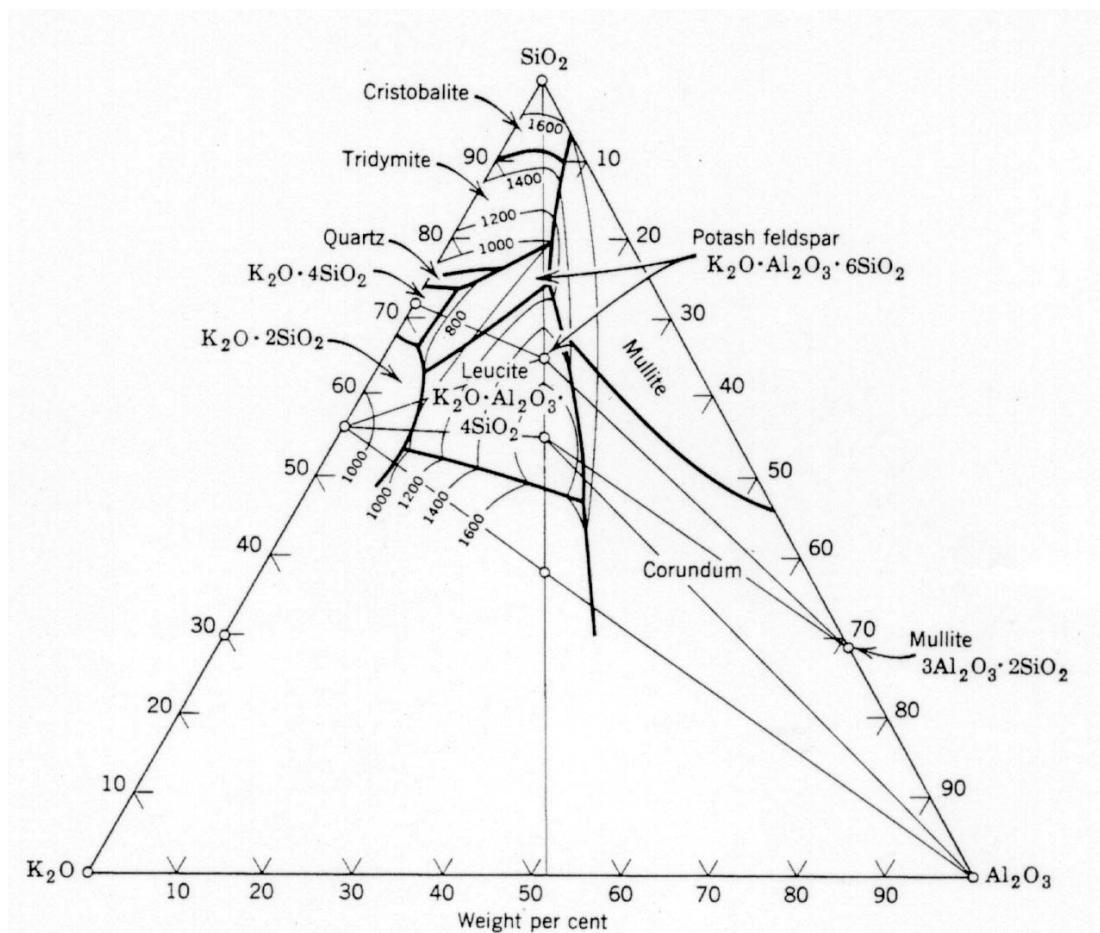


Figura 1 - Diagrama de equilíbrio ternário SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O . Porcelanas dentais são formuladas na região onde é formada a leucita. Intervalo de 1000 e 1600 °C. (5)

Muito tem sido escrito sobre o bom desempenho das propriedades das cerâmicas. Entretanto, existem dois problemas noticiados sobre seu comportamento no meio bucal. A sua friabilidade, ocasionando fraturas catastróficas, e o potencial abrasivo (rugosidade) de sua superfície, que acarreta o desgaste do dente antagonista. A fratura é geralmente atribuída à rápida propagação de trincas, através de um volume de material cerâmico, geralmente começando num defeito ou falha do material. O aumento da tenacidade à fratura é objetivo das técnicas recentemente desenvolvidas, que empregam porcelanas contendo dispersão de partículas de óxidos reforçadores como Al_2O_3 , ZrO_2 e MgO , ou mesmo cerâmicas a base desses óxidos. A utilização dessas cerâmicas envolve o uso de técnicas avançadas para a execução das peças dentais inteiramente de cerâmica.

O sistema todo cerâmico é atualmente disponível em cinco tipos de processos distintos: processo convencional por escultura da porcelana feldspática, processo de cerâmica usinada (Cerec), processo de cerâmica moldada sob pressão

(IPS Empress), processo de cerâmica infiltrada (In-Ceram) e processo de cerâmica injetada por centrifugação (Dicor) (3). Com exceção do processo convencional, as técnicas citadas utilizam cerâmicas de alto ponto de sinterização. Devido aos avanços significativos dessas cerâmicas de nova geração, a partir de 1990, tornou-se possível a execução de próteses dentais sem a subestrutura metálica. Há uma tendência natural de substituição da subestrutura metálica por cerâmicas de maior resistência mecânica (1,3). A translucência, a iridescência e a opacidade, obtidas por uma peça dental toda cerâmica é bem próxima ao dente natural, superando a prótese metal-cerâmica.

2.2 - CARACTERIZAÇÃO DO ADITIVO

A introdução de aditivos na etapa de manipulação dos pós cerâmicos permite obtermos uma viscosidade específica, que resulte no comportamento reológico requerido para um determinado sistema cerâmico. Os principais aditivos normalmente empregados num processo de prensagem são os ligantes, plastificantes e lubrificantes. O ligante providencia ao corpo prensado adequada resistência para o manuseio, e o plastificante modifica o ligante para torná-lo mais flexível. Os lubrificantes reduzem a fricção interpartículas e na parede do molde. Os efeitos combinados dos aditivos são de permitir as partículas de pó cerâmico deslizarem para um novo arranjo mais empacotado, e promover pressão equivalente em todas as regiões do granulado cerâmico (6,7).

Na ausência de ligações fortes como iônicas, covalentes e metálicas, todos átomos e moléculas exibem fracas atrações. Essas forças são resultantes de um potencial elétrico de um átomo ou molécula numa curta faixa de distância entre outros átomos ou moléculas. São chamadas forças de Van der Waals e são forças secundárias fracas, que também contribuem para a atração inter-atômica. As forças de Van der Waals originam-se de dipolos elétricos. O dipolo é formado por uma molécula assimétrica que provoca um desbalanceamento elétrico, permitindo um fraca ligação entre outras moléculas (8,9). Esse desbalanceamento forma-se devido aos elétrons compartilhados circundarem mais eficazmente o núcleo de um elemento da molécula do que um outro. Isto é, o centro de carga positiva não coincide com o centro de carga negativa, e desse modo ocorre a formação de um dipolo elétrico. As moléculas que apresentam este comportamento são chamadas de moléculas polares

(9). Forças de Van der Waals são responsáveis pela condensação de gases em líquidos, e o congelamento de líquidos em sólidos, na ausência de mecanismos fortes de ligação. Portanto, aspectos semelhantes das propriedades do comportamento da matéria como fricção entre partículas, tensão superficial, viscosidade, adesão, coesão e tantos outros, também são notados como efeitos do potencial de Van der Waals, sempre que as moléculas estejam dispostas muito próximas umas das outras. No processamento de aditivos cerâmicos as características da deformação e a dureza do ligante orgânico são dependentes das forças de Van der Waals. As variações de temperatura e umidade influenciam a magnitude dessas forças de atração(6,7). O aditivos empregados podem ser ligantes orgânicos como gomas naturais, polisacarídeos, alginatos refinados, éter celulose, álcoois polimerizados, resinas acrílicas e glicol (6,7).

O desenvolvimento de um comportamento reológico cerâmico aperfeiçoado, com finalidade específica de prensagem, é o objetivo da introdução de aditivos ligantes no processo de conformação cerâmica. Embora muitas destas substâncias adicionadas em pequenas quantidades, e que serão eliminadas posteriormente, não apareçam no produto final, são essenciais no processamento de um produto cerâmico. A seleção e controle dos aditivos são freqüentemente a chave para o sucesso na obtenção de um produto cerâmico sem defeitos.

2.3 - SISTEMA DE PRENSAGEM UNIAXIAL DE CERÂMICA DENTAL

2.3.1 - Moldagem

Para execução de uma restauração cerâmica dental pelo processo de prensagem, o cirurgião dentista deve realizar o preparo do dente de modo similar a uma coroa metal-cerâmica. Isto é, ombro com ângulo de 90° com a linha da margem gengivo-axial e ângulos agudos arredondados para evitar concentração de tensões. Porém a redução do dente deve ser maior, próximo de 1,5 mm para as superfícies vestibular, lingual e inter-proximal. A redução da base do dente deve ser reta para gerar uma coroa sem cortes inferiores. A técnica da cera perdida é empregada para obtermos a anatomia do dente. Um revestimento refratário é acondicionado num

muflo metálico para prensagem. Após a inclusão do modelo de cera, o muflo é fechado, e totalmente preenchido com revestimento, que endurece por cristalização. Quando o conjunto é aberto, obtemos o muflo e o contra-muflo para a prensagem. A cera é removida em seguida com jatos de vapor. O espaço antes ocupado pela cera torna-se um molde fiel da coroa restauradora, a qual se deseja reproduzir inteiramente em material cerâmico. O molde de revestimento refratário, após ser submetido ao tratamento térmico adequado para sua consolidação, estará pronto para receber a massa cerâmica formada pela mistura aditivo-cerâmica.

2.3.2 - Mistura Aditivo-Cerâmica

A literatura sobre aditivos indica o intervalo de 1 a 5 % em peso de aditivo, o qual é usualmente empregado num processamento cerâmico (2,5,6,7). A quantidade de pó cerâmico necessária para a realização de uma coroa unitária é muito pequena, se comparada a processos automatizados de produção, requerendo apenas de 1,0 a 2,0 g de pó para sua fabricação. A mistura do líquido aditivo ao pó cerâmico significa o controle sobre o comportamento reológico do sistema cerâmico na etapa de condensação. O aditivo ligante é hidrofílico, o que facilita a molhagem das partículas de pó cerâmico, promovendo a mistura ligante-cerâmica. Proporciona manipulação simples da massa cerâmica formada, e permite sua condução para o molde de revestimento refratário, para em seguida ser submetida a etapa de prensagem

2.3.3 - Prensagem Uniaxial a Frio

A prensagem é uma etapa do processamento cerâmico em que se efetua, simultaneamente, a conformação e a condensação do pó cerâmico. A prensagem uniaxial idealizada impõe uma condensação vigorosa e grande densidade às partículas cerâmicas antes da sinterização. A prensagem uniaxial envolve a compactação da massa cerâmica, confinada num molde rígido de revestimento cerâmico refratário pré-sinterizado, por uma pressão aplicada ao longo de uma direção axial através de um punção metálico (6). A garantia de fidelidade e resistência do molde refratário tornou-se atualmente possível, a partir da evolução dos novos revestimentos significativamente mais resistentes. A prensagem inclui as etapas de preenchimento do molde, compactação e ejeção. Uma tensão transmitida à massa cerâmica provoca deformação do granulado por deslizamento e rearranjo das partículas. Essas deformações reduzem a porosidade e aumentam o número de contatos inter-

granulares. O ar comprimido nos poros migra para o molde, onde é eliminado. A compactação ocorre pela fratura e deformação do granulado, o que reduz o volume dos interstícios e elimina os poros no meio do granulado deformado, promovendo uma maior condensação das partículas cerâmicas (6,7).

2.3.4 - Secagem

Secagem é a remoção de líquido do interior de um material poroso, por meio de transporte e evaporação, por um gás insaturado no meio. É uma importante operação antes da sinterização no processo de conformação dos pós cerâmicos. Deve ser cuidadosamente controlada, pois tensões produzidas pelo diferencial de contração, ou pela pressão de gás, podem causar defeitos no produto final (6). O transporte de energia térmica para o interior do material dá origem aos mecanismos de secagem. O líquido é transportado através dos vazios para os meniscos pelas forças dirigentes de evaporação, e através dos poros para a superfície pelo vapor. As forças dirigentes são originadas pela diferença de pressão, que existe no equilíbrio entre a superfície curva e o interior do material cerâmico. Entre o ar móvel e um material estacionário existe uma camada estática de ar e vapor. A migração do líquido para esta superfície ocorre por fluxo capilar, difusão química e difusão térmica (7). Com a remoção do líquido e conseqüente redução da distância inter-partículas ocorre a primeira contração do produto cerâmico.

Uma fração de volume de ligante orgânico deve ser removida do corpo cerâmico compactado, sem trincas ou distorções. Técnicas como evaporação, extração por solvente e extração capilar podem ser usadas para remoção do ligante orgânico. Para eliminar os orgânicos residuais utiliza-se decomposição e reações de oxidação. Estas reações ocorrem na temperatura maior do que a de evaporação, isto é, acima de 600°C, e resultam em fases gasosas como H₂O, CO e CO₂. A temperatura deve ser reduzida lentamente, para permitir que o gás possa difundir-se para fora dos poros compactados, sem criar pressão suficiente para causar trincas (6). Para a obtenção de produtos sem defeitos objetiva-se uma contração de comportamento isotrópico. Isto é, a variação de volume deve possuir uma correlação com a contração linear. Secagem não uniforme causa empenos no produto final, e o período de secagem não pode ser curto. Após a secagem, o produto cerâmico é referido como produto a verde (6,7).

2.3.5 - Sinterização

Sinterização é o termo usado para descrever a consolidação do produto durante a queima. Esta consolidação significa que as partículas do material cerâmico vão ser unidas propriamente num agregado, para formar uma restauração dental desejada. A sinterização também pode ser interpretada como um indicativo de que a contração e densificação ocorreram (6). Algumas reações químicas ocorrem durante a sinterização. De particular importância, são observadas mudanças no teor de leucita em porcelanas dentais. Resfriamentos lentos tendem a aumentar as frações volumétricas de leucita, com relação aos teores de leucita encontrados nos resfriamentos rápidos.

As mudanças que ocorrem no material cerâmico na pré-síntese são a secagem, decomposição dos ligantes orgânicos e vaporização da água quimicamente combinada. As reações de sinterização ocorrem, quando a temperatura aplicada ao sistema alcança a faixa entre a metade e dois terços da temperatura de fusão do material. Esta energia é suficiente para causar difusão atômica no estado sólido e escoamento viscoso, quando uma fase líquida está presente (7). Produtos cerâmicos sinterizados representam um sistema de materiais que podem variar em número de componentes, características das partículas, complexidade das reações químicas envolvidas e mecanismos de contração durante a síntese. As mudanças que ocorrem na micro-estrutura, quando é realizada a sinterização, são novas características de empacotamento das partículas.

A densificação do produto cerâmico durante a sinterização ocorre através dos mecanismos de transporte de massa. Entre os mecanismos de transporte existentes alguns não causam densificação diretamente. É o caso da difusão de superfície, que é um mecanismo de transporte que promove o alisamento da superfície dos grãos, união das partículas e arredondamento dos poros, mas não produz contração de volume ou densificação. Outro mecanismo que também não causa densificação é o transporte de vapor do interior para a superfície do produto, onde apresenta menor pressão de vapor. Os principais mecanismos de difusão, que causam contração, são difusão de contorno dos grãos e difusão de rede. O mecanismo de difusão ao longo do contorno dos grãos produz o crescimento do pescoço entre as partículas. Este crescimento do pescoço reduz o tamanho dos vazios e desloca-os para regiões

côncavas do granulado. O mecanismo de difusão de rede transporta os vazios para a superfície, com um concomitante escoamento de átomos em direção oposta. O efeito combinado destes dois mecanismos de difusão vai provocar a contração dos interstícios, promovendo um empacotamento mais denso e uniforme do material cerâmico sinterizado. Os mecanismos de escoamento viscoso e deformação plástica são efetivos somente quando uma fase líquida estiver presente e uma pressão for aplicada. Estes últimos mecanismos também causam contração, devido a uma redução do espaçamento interpartículas e decréscimo da quantidade de vazios (7).

3 - PROPOSIÇÃO

Desenvolver um processo de prensagem e sinterização da cerâmica dental, de modo que a torne mais funcional e resistente à fratura, do que a obtida pelo processo convencional, e comprovar o aumento de tenacidade à fratura das peças cerâmicas prensadas em relação às convencionais.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1- PROCESSO DE PRENSAGEM UNIAXIAL A FRIO DE CERÂMICA DENTAL

O processo de prensagem uniaxial é realizado por muflos metálicos, que são usados para acondicionar o molde da peça cerâmica em revestimento refratário, e proporcionar resistência adequada a esse molde no momento da compressão. O molde de revestimento refratário é fabricado pelo processo de cera perdida, considerado de alta precisão na área dental. Um aditivo ligante é misturado a porcelana dental, formando uma massa de baixa viscosidade. Esta massa é conduzida ao molde refratário e o conjunto é submetido a uma carga de compressão de 40 MPa. Em seguida o muflo é aberto, a porcelana é levada ao forno para uma etapa de secagem, e na sequência, utiliza-se um forno a vácuo para sua sinterização.

Da etapa inicial de moldagem, até a sinterização do produto cerâmico, apenas o líquido aditivo é um novo material introduzido no processo, quando comparado com a técnica convencional usada pelos profissionais protéticos dentais. Os equipamentos necessários, para a execução do processo de prensagem uniaxial de

cerâmica dental, são os já existentes nos melhores laboratórios de prótese dental. Esse processo experimental apresentado foi realizado no laboratório de prótese dental Honório Massuda, RJ, Brasil. O objeto do processo em estudo é a obtenção de uma coroa total restauradora, feita inteiramente de material cerâmico. A seguir é apresentado um resumo dos materiais e equipamentos utilizados no processo. Maiores detalhes do procedimento prático podem ser solicitados.

Resumo dos materiais utilizados no processo de consolidação de cerâmica dental:

- Cerâmica dental feldspática; marca Creation, distribuída por Jensen Industries Incorporated, North Haven, USA; partículas de tamanho 5,0; 30,0; 70,0; 90,0 μm (10).
- Aditivo ligante experimental a base de álcool polimerizado para prensagem.
- Cera sólida; marca Kerr.
- Revestimento cerâmico refratário Fortune; marca Williams, USA.
- Silicone extra duro Zetalabor; marca Zhermack, Itália.

Resumo dos equipamentos:

- Instrumentos protéticos de espatulação e corte.
- Balança eletrônica; marca Tanita, sensível 0,1g.
- Muflo metálico para prensagem n.º 1; marca Uraby.
- Vibra-molde; marca Rhos.
- Prensa manual de bancada; marca Bravac, 2 toneladas.
- Forno do tipo mufla; marca Bravac.
- Forno a vácuo; modelo Phoenix; marca Dentsply; USA.

4.2 - TESTE COMPARATIVO DE TENACIDADE À FRATURA

O teste de tenacidade à fratura foi empregado, para comprovar um possível aumento de resistência mecânica, da nova micro-estrutura do produto cerâmico, quando feito pelo processo de prensagem uniaxial. A concepção do teste está apoiada na comparação direta de peças cerâmicas feitas pelo processo convencional e pelo de prensagem apresentado. Para o teste comparativo foram utilizados corpos de prova na forma de pequenos blocos de cerâmica dental, de dimensões 4,0 x 8,0 x 8,0 mm. Para o teste de tenacidade à fratura foi empregada uma carga de 30,0 Kgf com indentador Vickers. Em materiais cerâmicos a impressão de dureza é acompanhada da ocorrência de trincas. O tamanho das trincas está associado à carga empregada e pode ser relacionado diretamente com o valor de tenacidade à fratura do material (K_{IC})

(11,12,13,14). Portanto, a medida da extensão da trinca possibilita estimar o valor de tenacidade à fratura do material. É empregado um microscópio ótico para medir a extensão da trinca como mostra o desenho da figura 2. O teste de tenacidade à fratura obtido por esse método de medição direta da fratura é realizado de forma rápida com amostras processadas em escala de laboratório.

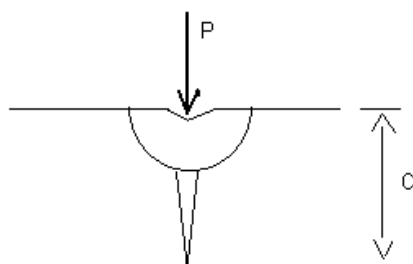


Figura 2 - A medida da extensão da trinca (C) permite a determinação direta da tenacidade à fratura do material (K_{IC}).

Os corpos de prova após submetidos a carga de impressão de dureza (30,0Kgf), são cortados justamente no plano da trinca formada pela impressão. Este plano da amostra é lixada com lixas 300, 400, 500 e 600. Em seguida polida com pasta de diamante 7, 3 e 1 μm . O plano da trinca imposta pela impressão é alcançado possibilitando a medição do comprimento da trinca no microscópio ótico. O microscópio usado foi da marca Leica, modelo DMRM, de até 1000 vezes de aumento. Deste modo, obtém-se os comprimentos das trincas de todos os corpos de prova submetidos a impressão de dureza. Com o emprego da fórmula de cálculo da tenacidade à fratura pela medição direta da trinca, desenvolvida por Anstis et al.,^[21] obtemos os valores de K_{IC} pela equação 1.

$$K_{IC} = 0,016 (E / HV)^{0,5} \cdot (P / C^{1,5}) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde, (E) Módulo de elasticidade da cerâmica;

(HV) Dureza Vickers;

(P) Carga aplicada;

(C) Comprimento da trinca imposta pela impressão de dureza.

5 - RESULTADOS

5.1 - PROCESSO DE Prensagem UNIAXIAL DE CERÂMICA DENTAL

Foram encontrados os intervalos de trabalho das principais variáveis que influem no processo de prensagem uniaxial de cerâmica dental, tais como: tempo de prensagem (2h); tempo de secagem (2h); temperatura de secagem (200 °C) e sinterização (960 °C). A foto de uma coroa toda cerâmica obtida pelo processo de prensagem uniaxial pode ser vista na figura 3.



Figura 3 - Foto de uma coroa toda cerâmica obtida por prensagem. (fig 27 da tese)

5.2 - TESTE COMPARATIVO DE TENACIDADE À FRATURA (K_{IC}).

Tabela 1 - Comprimentos das Trincas (C) e “ K_{IC} ” calculado para cada amostra.

CERÂMICA	AMOSTRAS	C (mm)	K_{IC} (MPa.m ^{0,5})
Convencional	C1	0,75	0,51
	C2	0,75	0,51
	C3	1,35	0,21
Prensada	P1	0,39	1,26
	P2	0,27	2,19
	P3	0,45	1,02

Tabela 2 - Resultado do Teste de Tenacidade à Fratura.

	K_{IC} (conv)	K_{IC} (prens)
MÉDIA (Amostras) ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$)	0,41	1,49
DESVIO P. (Média) ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$)	0,17	0,62
CVTM *	42 %	42 %
Diferença ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$)		1,08
% Diferença		265 %

* CVTM - Coeficiente de variação em torno da média.

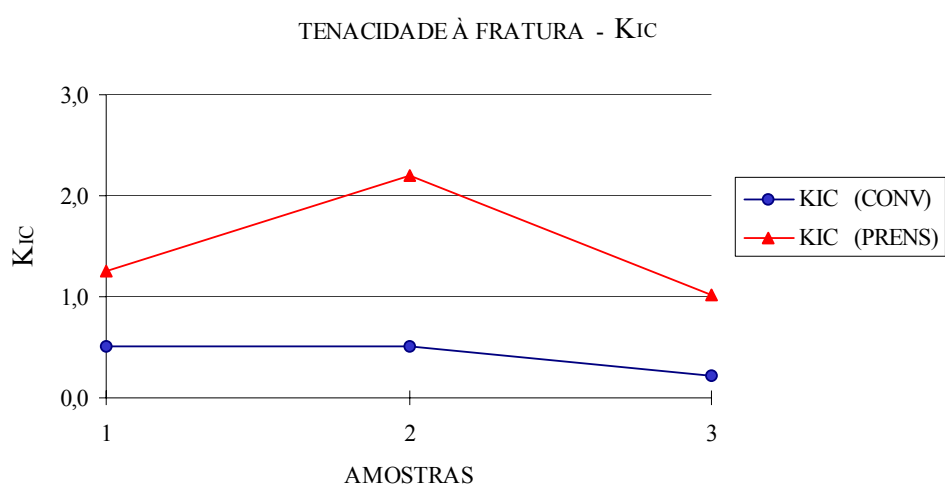


Figura 4 - Gráfico dos valores de tenacidade à fratura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$) das amostras cerâmicas convencionais e prensadas. No eixo X, o número (1) representa as amostras C1 e P1; (2) amostras C2 e P2; (3) amostras C3 e P3.

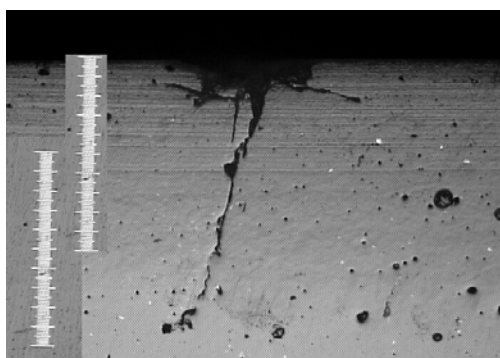


Figura 5 - Fotomicrografia digitalizada da trinca originada pela impressão de dureza na amostra convencional. Através de dois padrões de 1,0 mm do microscópio ótico, pode ser feita a medição do comprimento dessa trinca. Aproximadamente $C = 1,35$ mm. Aumento 48x.

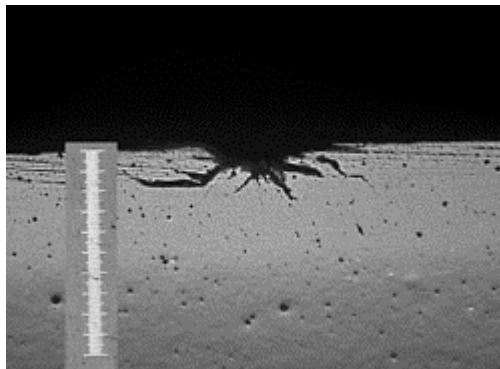


Figura 6 - Fotomicrografia digitalizada da trinca originada pela impressão de dureza na amostra prensada. Através de um padrão de 1,0 mm do microscópio ótico, pode ser feita a medição do comprimento dessa trinca. Aproximadamente $C = 0,27$ mm. Aumento 48x.

6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O teste de tenacidade à fratura vai determinar realmente se há um avanço significativo da peça cerâmica dental, quando obtida pelo processo de prensagem, pois a friabilidade ou baixa tenacidade da cerâmica, é noticiada em dentística, como uma fratura catastrófica que ocorre no meio bucal do paciente.^[11] Portanto, o aumento significativo de tenacidade à fratura das peças cerâmicas prensadas, como indicado na tabela 2, representa um avanço na segurança do cirurgião dentista, ao conduzir a prótese restauradora para a prova, e após sua cimentação no dente de seu paciente. A diferença entre as amostras convencionais e prensadas foi em média 265 %. Entretanto, pode-se comprovar se este aumento é significativo, com o emprego da análise de variância, onde calcula-se a variância da média das amostras e estima-se a variância de tenacidade à fratura das populações de peças cerâmicas convencionais e prensadas. Pela razão de variância entre as populações prensadas e convencionais, obtemos $F_{\text{calculado}} = 12,97$. Para o grau de liberdade do numerador de 1 e grau de liberdade do denominador de 4, temos na tabela de Fischer, para um erro estimado de 5 %, $F_{\text{tabelado}} = 7,71$. Então temos, $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$. Este resultado indica que a hipótese das amostras serem diferentes é verdadeira. Isto é, existe diferença significativa de tenacidade à fratura entre os valores das amostras cerâmicas

convencionais e prensadas. O aumento significativo de tenacidade à fratura de peças cerâmicas dentais possibilita ao cirurgião dentista, reavaliar as opções de emprego do material cerâmico como prótese dental. A obtenção de uma peça toda cerâmica, pelo processo de prensagem, oferece um intervalo de confiança de 95%, da peça possuir mais de 265 % de tenacidade à fratura, do que uma peça de cerâmica convencional. Desse modo, pode-se reduzir para estatísticas quase nulas, a ocorrência de fraturas catastróficas da prótese toda cerâmica, no meio bucal de um paciente. Este é o principal avanço obtido pelo processo de prensagem uniaxial estudado, que pode ser oferecido aos profissionais dentais envolvidos com a fabricação de próteses cerâmicas.

A utilização de cerâmica como um componente na restauração dental está apoiada nas patentes US 3,052,982, US 3,052,983 (15,16). A técnica desenvolvida de prensagem uniaxial de cerâmica apresenta no plano dental alguns aspectos de interesse do cirurgião dentista. Pode ser citado como exemplo o aspecto de adaptação da prótese cerâmica ao dente restaurado, que está relacionado a contração de queima do material cerâmico na etapa de sinterização. A adaptação de uma peça dental restauradora qualquer é considerada aceitável, pelos profissionais dentais, por critérios visuais e de manipulação da peça dental com o modelo de gesso, que simula as condições iniciais de adaptação da peça ao dente restaurado. Portanto, quantificar a adaptação das peças cerâmicas dentais restauradoras prensadas, comparando-as com outras peças cerâmicas, obtidas por outras técnicas, configura-se num trabalho futuro necessário, para determinar a magnitude do espaçamento limite entre a prótese e o dente restaurado, o que vai resultar em parâmetros de uma adaptação ideal para todo tipo de prótese.

O processo de prensagem obtém inicialmente peças cerâmicas feitas de apenas uma cor. O protético dental pode caracterizar e aprimorar os detalhes da oclusal, se o requerimento personalizado for rigoroso. Este procedimento envolve outra queima da peça cerâmica e configura-se em um trabalho futuro à ser desenvolvido, já que uma nova camada vítrea será aplicada na superfície da peça. Desse modo, pode-se quantificar um novo aumento de resistência mecânica e a redução da rugosidade superficial. A rugosidade é um problema apontado na cerâmica, que causa o desgaste por abrasão do dente antagonista (3).

Rosenblum et al. (3); no seu artigo sobre o panorama atual das técnicas de execução de restaurações cerâmicas, publicado no jornal da Associação Dental Americana, edição de março de 1997, compara os processos existentes quanto a abrasão dos dentes antagonistas, equipamentos especiais necessários e características particulares de cada processo. Quanto aos equipamentos necessários, Rosemblum cita os processos: Cerec Vitablocs, que utiliza o programa CAD-CAM para a usinagem de lingotes cerâmicos, por um sistema de leitura ótica digitalizada; o processo de moldagem sob pressão IPS Empress, que emprega um forno específico, materiais especiais e equipamentos de modelagem exclusivos; processo de cerâmica infiltrada In-Ceram, que necessita de materiais especiais e forno específico de alta temperatura; processo de centrifugação Dicor, que é necessário revestimento de alta temperatura e equipamentos especiais para fundição e centrifugação da cerâmica. O processo convencional possui a complexidade conhecida para a realização da escultura da massa cerâmica, com seus detalhes peculiares da morfologia dental. Portanto, no aspecto de equipamentos necessários, o processo de prensagem pode ser considerado muito simples, pois utiliza apenas uma prensa manual, já existente nos laboratórios de prótese dental. Custos adicionais de fabricação são considerados pelos profissionais dentais, como desvantagens dos novos processos de obtenção de uma prótese dental toda cerâmica.

A inovação introduzida na área dental pelo processo de prensagem uniaxial de cerâmica, está apoiada na incorporação do aditivo orgânico ao pó cerâmico, na etapa de prensagem e na etapa de secagem da massa cerâmica prensada. A utilização da técnica de moldagem por cera perdida, não se constitui numa inovação, porém sua nova forma de emprego, utilizando revestimento cerâmico refratário, acondicionado em muflos metálicos para prensagem, e consolidado térmicamente, é de certo modo um avanço no emprego dessa técnica no setor dental. O líquido aditivo ligante é o único material novo, introduzido pelo processo de prensagem uniaxial, em relação ao processo convencional. De composição simples, o aditivo estudado pode ser utilizado em qualquer cerâmica feldspática, ou em novas cerâmicas dentais de composições avançadas, recentemente desenvolvidas, pois não interfere nas propriedades estéticas, nem reage quimicamente com pigmentos orgânicos contidos nos pós cerâmicos.

Além do que, após as etapas de secagem e sinterização, as substâncias presentes no líquido aditivo ligante são quase totalmente eliminadas.

A etapa de prensagem uniaxial da cerâmica dental ou porcelana dental rende sua conformação e condensação simultaneamente, resultando numa compactação otimizada da massa cerâmica formada, devido ao vigoroso empacotamento das partículas cerâmicas imposto pela carga de compressão (17,18). Várias consequências positivas podem ser apontadas a partir deste procedimento, como aumento significativo da tenacidade à fratura e dureza das peças cerâmicas prensadas, obtenção de próteses cerâmicas dentais confiáveis, com estética refinada e padronização do processo de produção, reduzindo a complexidade na fabricação de próteses desse tipo. Portanto, a substituição da etapa de escultura da massa cerâmica do processo convencional, pela etapa de prensagem uniaxial do processo apresentado, proporciona ao profissional protético a obtenção da morfologia do dente, e a condensação da massa cerâmica, num só procedimento. Essa inovação aproxima-se do novo conceito de produção “**material - processo - produto**”, numa só operação (19). Pode revelar uma técnica de baixo custo, entre os processos de fabricação de próteses dentais inteiramente de cerâmica atualmente existentes.

A etapa de secagem também é considerada de grande importância no processo estudado, pois vai ser responsável pela obtenção de produtos cerâmicos sem falhas, trincas, empenos e porosidades. O aumento gradativo da temperatura e longos intervalos de tempo de secagem são indispensáveis ao sucesso da fabricação de peças cerâmicas. No caso de peças dentais, com pequenas dimensões e necessidade de grande precisão de encaixe e utilização, a secagem deve ser executada com muito critério, e cuidadosamente controlada, para resultar numa prótese dental sem os defeitos citados acima.

Uma comparação direta dos custos dos novos processos citados é inevitável. Excluindo-se o processo convencional, a aquisição de qualquer outro processo custa no mínimo 30.000 US\$. O processo de prensagem uniaxial vai reduzir custos, porque utiliza os equipamentos já existentes no laboratório de prótese dental. Portanto, não há custos com novos equipamentos, nem com novas cerâmicas especiais, necessários para a conformação da cerâmica, que são empregados em outros novos processos avançados. Os custos com aquisição de tecnologia do processo de prensagem estudado, devem ser sensivelmente menores, do que os custos de processos avançados

de moldagem sob pressão, usinagem com fresadeiras informatizadas, fornos especiais de alta temperatura, equipamentos especiais para injeção e centrifugação de cerâmica fundida a 1300° C. O processo de prensagem uniaxial necessita, basicamente, apenas do líquido aditivo ligante.

O aspecto de padronização na execução da prensagem pode possibilitar uma reavaliação da funcionalidade do laboratório de prótese dental. A padronização reduz a complexidade no processo e permite fabricar peças toda cerâmica, por protéticos não tão especializados, como necessário para o domínio da técnica de cerâmica convencional. Para o profissional protético dental que domina a técnica convencional, o processo de prensagem uniaxial de cerâmica pode ampliar sua produção diária, ao obter em série várias peças cerâmicas restauradoras. Portanto, pode-se esperar uma possível redução do custo da mão de obra, na execução de próteses dentais desse tipo. O efeito da redução dos custos de fabricação das peças dentais é obviamente a diminuição do custo dessas próteses restaurativas para o cliente final. Esse fenômeno proporciona uma maior possibilidade de escolha dos materiais, que serão empregados no setor dental por parte da sociedade.

7 - CONCLUSÃO

Foram encontrados os intervalos de trabalho das variáveis que influem no processo de prensagem, tais como: tempo de prensagem e secagem, temperatura de secagem e sinterização. O teste comparativo de tenacidade à fratura mostrou em média um aumento significativo de 265% das amostras prensadas, em relação as amostras feitas pelo modo convencional. Este resultado pode reduzir para estatísticas quase nulas, o risco de uma fratura catastrófica de uma prótese dental toda cerâmica, na boca de um paciente.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- PHILLIPS, Ralph - Science of Dental Materials. W.B. Saunders Co., Tenth edition, Philadelphia - USA - 1996.
- 2- ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK - Ceramics and Glasses. Volume 4. ASM International. USA - 1991.
- 3- ROSENBLUM, Marc et al. - A Review of All-Ceramic Restorations. Journal of American Dental Association. March, 1997. ADA Publishing Co., Inc. - USA - 1997.
- 4- HENCH, Larry - Bioceramic: from concept to Clinic. Department of Materials Science and Engineering. University of Florida. Gainesville - USA - 1993.
- 5- KINGERY, W. - Introduction to Ceramics. Wiley Interscience Publication. New York - USA - 1992.
- 6- RICHERSON, David - Modern Ceramic Engineering. Marcel Dekker Inc. New York - USA - 1992.
- 7- REED, James - Introduction to the Principles of Ceramic Processing. John Wiley & Sons. New York - USA - 1988.
- 8- BEISER, Artur - Concepts of Modern Physics. Fourth edition. Mcgraw-Hill Book. New York - USA - 1990.
- 9- PUGH, Robert - Surface in Advanced Ceramic Processing. Marcel Dekker Inc. New York - USA - 1994.
- 10- CREATION - Catálogo Cerâmica Creation. Jensen Industries Incorporated. North Haven - USA - 1997.
- 11- NÓBREGA, M. Cecília et al. - Tenacidade à fratura de óxidos cerâmicos. Revista Brasileira de Cerâmica. Vol. XXXV - nº 239, pp. 165-168. Rio de Janeiro - Brasil - 1989.
- 12- ORANGE, G. et al. - Fracture Toughness of Pressureless Sintered Silicon Carbide: Comparison of K_{IC} Measurement Methods, Ceramic International, 13, pp. 159-165, 1988.
- 13- VARNER, James et al. - Fractography of Glasses and Ceramics - The American Ceramic Society, Inc., New York - USA - 1988.
- 14- CALLISTER, William - Materials Science and Engineering. John Wiley & sons, Inc., 4th edition. New York - USA - 1997.
- 15- WEINSTEIN, M. ; KATZ, S. - Fused porcelain-to-metal teeth. US Patent 3,052,982. Sept. 11, 1962.
- 16- WEINSTEIN, M. ; KATZ, S. - Porcelain-covered metal-reinforced teeth. US Patent 3,052,983. Sept. 11, 1962.
- 17- DENRY, Isabelle - Recent advances in ceramics for dentistry. International Journal of Prosthodontics; p.134-143 ; July, 1996. USA.
- 18- BARREIRO, M. et al. - Kinetics of isothermal phase transformations in a dental porcelain. The Journal of Prosthetic Dentistry; p. 431-436 ; October, 1992. USA.

19-COHENDET, Patrick et al. - New Advanced Materials. Springer Verlag Editor. Brussels, Luxembourg. Print in Germany. 1988.