



**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ODONTOLOGIA DE ARARAQUARA**



**DIOGO LONGHINI**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UMA PORCELANA DE  
APLICAÇÃO CONVENCIONAL E UMA Prensada PARA  
RECOBRIMENTO DE INFRAESTRUTURAS DE ZIRCÔNIA E O  
EFEITO DO MÉTODO DE RESFRIAMENTO NA RESISTÊNCIA À  
FLEXÃO BIAxIAL DO CONJUNTO ZIRCÔNIA/PORCELANA**

Araraquara

2014



**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ODONTOLOGIA DE ARARAQUARA**



**DIOGO LONGHINI**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UMA PORCELANA DE  
APLICAÇÃO CONVENCIONAL E UMA Prensada PARA  
RECOBRIMENTO DE INFRAESTRUTURAS DE ZIRCÔNIA E O  
EFEITO DO MÉTODO DE RESFRIAMENTO NA RESISTÊNCIA À  
FLEXÃO BIAxIAL DO CONJUNTO ZIRCÔNIA/PORCELANA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Reabilitação Oral, Área de Prótese, da Faculdade de Odontologia de Araraquara, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para título de mestre em Reabilitação Oral.

Orientador: Prof. Dr. Gelson Luis Adabo

Araraquara

2014

Longhini, Diogo

Caracterização mecânica de uma porcelana de aplicação convencional e uma prensada para recobrimento de infraestruturas de zircônia e o efeito do método de resfriamento na resistência à flexão biaxial do conjunto zircônia/porcelana / Diogo Longhini - Araraquara: [s.n.], 2014.

109 f. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Odontologia

Orientador: Prof. Dr. Gelson Luis Adabo

1. Porcelana dentária 2. Zircônio 3. Resistência de materiais 4. Dureza

I.Título

**DIOGO LONGHINI**

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UMA PORCELANA DE  
APLICAÇÃO CONVENCIONAL E UMA Prensada PARA  
RECOBRIMENTO DE INFRAESTRUTURAS DE ZIRCÔNIA E O EFEITO  
DO MÉTODO DE RESFRIAMENTO NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO  
BIAXIAL DO CONJUNTO ZIRCÔNIA/PORCELANA

COMISSÃO JULGADORA

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Gelson Luis Adabo

2º examinador: Profª Drª Renata Garcia Fonseca

3º examinador: Prof. Dr. Igor Studart Medeiros

Araraquara, 20 de fevereiro de 2014

## **DADOS CURRICULARES**

**DIOGO LONGHINI**

**NASCIMENTO:** 04/10/1989

Araraquara/SP

**FILIAÇÃO:**

Geraldo Longhini Junior

Cristina Maria de Lima Longhini

**2007-2011: Curso de Graduação em Odontologia**

Faculdade de Odontologia de Araraquara (UNESP)

**2012-2014: Curso de Mestrado – Área de Prótese**

Programa de Pós-Graduação em Reabilitação Oral

Faculdade de Odontologia de Araraquara

Universidade Estadual Paulista – UNESP

**DEDICATÓRIA**

---

Dedico este trabalho...

À minha família por todo amor, apoio e confiança.

À minha namorada Cibele, por toda paciência, amor e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Gelson Luis Adabo, que me orienta de forma exemplar desde 2009 em projetos de iniciação científica, sendo agora o professor responsável pela orientação deste Mestrado.

**AGRADECIMENTOS**

---

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente aos meus pais Geraldo e Cristina, por todo amor e apoio. Tudo o que alcancei em minha vida só foi possível graças a eles. Sei que nunca mediram esforços para que eu alcançasse os meus sonhos. Podem ter certeza de que vou fazer de tudo para que vocês sempre se orgulhem de mim. Obrigado por tudo. Amo vocês!

Serei sempre grato à minha irmã Renata. Você é meu exemplo. Segui seus passos na Odontologia. Serei sempre seu admirador e amigo para todas as horas.

Agradeço à minha namorada Cibele, por todo amor, carinho e companheirismo. Você foi a responsável por sempre manter meu chão nos momentos difíceis. Nas longas noites de estudo você sempre esteve ao meu lado, me dando apoio. E como a vida torna-se suave com um grande amor ao lado. Obrigado por fazer meus dias sempre especiais.

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Gelson Luis Adabo, por ser meu grande exemplo na área acadêmica. Obrigado por ter depositado confiança em mim e ter me oferecido grandes oportunidades desde 2009, quando eu ainda era aluno de iniciação científica. É uma honra fazer parte da sua equipe até os dias de hoje. Obrigado pelo apoio na realização deste sonho.

Não posso deixar de agradecer aos professores da Disciplina de Materiais Dentários da Faculdade de Odontologia de Araraquara (UNESP): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Renata Garcia Fonseca, Prof. Dr. Luiz Geraldo Vaz, Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos Cruz e meu orientador Prof. Dr. Gelson Luis Adabo. A união e companheirismo de vocês é algo que vou sempre admirar. Uma grande experiência em minha vida foi fazer o estágio de docência do mestrado com vocês. Obrigado pela oportunidade.

Agradeço muito também ao Prof. Dr. Antonio Alves de Almeida Júnior, que fazia doutorado quando eu estava na iniciação científica até o início do meu mestrado.

Obrigado pelo apoio e amizade desde 2009, quando comecei minhas atividades pesquisa. Aprendi demais com você.

Agradeço aos professores do Departamento de Materiais Odontológicos e Prótese da Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP, por toda competência e importância em minha formação.

Aos funcionários da Pós-graduação, em nome de Mara Cândida, pela prontidão, disponibilidade e simpatia com que sempre me atenderam.

Agradeço à Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP na pessoa de sua diretora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Andréia Affonso Barreto Montandon pela oportunidade profissional concedida.

Ao Departamento de Materiais Odontológicos e Prótese da Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP, representados pelo Chefe de Departamento Prof. Dr. Francisco de Assis Mollo Jr.

À Coordenação da Pós-Graduação em Reabilitação Oral da Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP, representada pela coordenadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Cláudia Pavarina.

Muito obrigado.

**ΕΠΙΓΡΑΦΕ**

---

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém  
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

**RESUMO**

---

Longhini D. Caracterização mecânica de uma porcelana de aplicação convencional e uma prensada para recobrimento de infraestruturas de zircônia e o efeito do método de resfriamento na resistência à flexão biaxial do conjunto zircônia/porcelana[Dissertação de Mestrado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2014.

## RESUMO

Este estudo caracterizou mecanicamente uma porcelana feldspática de aplicação convencional e uma porcelana feldspática prensada, indicadas para infraestrutura em zircônia, quanto a resistência à flexão biaxial, dureza Vickers e tenacidade à fratura. Além disso, foi investigado o efeito da taxa de resfriamento após o ciclo de sinterização do glaze da porcelana na resistência à flexão biaxial de bicamadas zircônia/porcelana. Espécimes monocamada de VM9 (n=15) e Vita PM9 (n=15) (12,0 mm de diâmetro x 1.2 mm de espessura) foram confeccionados conforme as recomendações do fabricante e submetidos ao ensaio de resistência à flexão biaxial (MPa). Um fragmento de cada espécime fraturado foi aleatoriamente selecionado para a mensuração da dureza Vickers (n=15) (VHN). A tenacidade à fratura aparente (MPa.m<sup>1/2</sup>) foi determinada pela técnica da indentação Vickers (n=15). Para o ensaio de flexão biaxial dos bicamadas, discos de zircônia (Vita In-Ceram YZ) foram recobertos com porcelana convencional Vita VM9 (n=30) ou com porcelana prensada Vita PM9 (n=30). Após a simulação da queima de glaze, os espécimes foram submetidos a resfriamento rápido (n=15) ou lento (n=15). Após o ensaio de resistência à flexão, os espécimes foram analisados quanto ao tipo de fratura. Teste de T-Student para espécimes monocamada mostrou que Vita PM9 apresentou valores significativamente maiores de resistência à flexão biaxial ( $p<0,01$ ) e dureza ( $p=0,017$ ) em relação a Vita VM9, mas não quanto a tenacidade à fratura ( $p=0,41$ ). ANOVA a dois fatores (porcelana e método de resfriamento), utilizada para análise dos bicamadas indicou significância apenas para porcelanas, com superioridade para a combinação Vita PM9/zircônia ( $p<0,01$ ). Porcelanas prensadas parecem ser uma alternativa mais efetiva para recobrimento de zircônia em relação as convencionais.

Palavras-chave: Porcelana Dentária, Zircônio, Resistência de Materiais, Dureza

**ABSTRACT**

---

Longhini D. Mechanical characterization of a conventional porcelain and a pressable porcelain for zirconia core, and the effect of the cooling method on the biaxial flexural strength of bilayers zirconia/porcelain. [Dissertação de Mestrado] Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2014.

## **ABSTRACT**

This study characterized mechanically a conventional and a pressed feldspathic porcelain indicated for zirconia core in terms of biaxial flexural strength, fracture toughness, Vickers hardness. In addition it was investigated the effect of the glaze cooling rate on the biaxial flexural strength of the zirconia/porcelain bilayer. Specimens monolayers of Vita VM9 (n=15) and Vita PM9 (n=15) (12.0 mm diameter x 1.2 mm thickness) were prepared according to manufacturer's recommendations for the biaxial flexural strength test (MPa). Afterwards, one fragment of each broken specimen was randomly selected for Vickers hardness measurements (n=15) (VHN). Apparent fracture toughness (MPa.m<sup>1/2</sup>) was determined by Vickers hardness indentation technique (n=15). For the biaxial flexural strength of bilayers, zirconia discs (Vita In-Ceram YZ) were veneered with the conventional porcelain Vita VM9 (n=30) or with the pressed porcelain Vita PM9 (n=30). After the glaze firing simulation, the specimens were submitted to fast (n=15) or slow cooling method (n=15). After the biaxial flexural test, the specimens were analyzed in relation to fracture pattern. T-Student tests were performed for the monolayer specimens, while two-way ANOVA (porcelain and cooling method) was used for the bilayer ones ( $\alpha=.05$ ). Vita PM9 exhibited significantly higher biaxial flexural strength ( $p<0.01$ ) and hardness than VM9 ( $p=0.017$ ). However, there was no significant difference ( $p= 0.41$ ) in fracture toughness between the porcelains. The two-way ANOVA indicated significance only for the porcelain, with superiority for the combination Vita PM9/zirconia ( $p<0.01$ ). The pressed porcelain seems to be a mechanically more effective alternative for zirconia veneering than the conventional one.

**KEYWORDS:** Dental Porcelain, Zirconium, Material Resistance, Hardness.



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	25
3	PROPOSIÇÃO .....	70
4	MATERIAL E MÉTODO .....	72
4.1	Material .....	73
4.2	Caracterização das porcelanas de cobertura .....	73
4.2.1	Confecção dos corpos-de-prova monocamada de VM9 .....	74
4.2.2	Confecção dos corpos-de-prova monocamada de PM9 .....	75
4.2.3	Ensaio de flexão biaxial .....	80
4.2.4	Dureza Vickers .....	82
4.2.5	Tenacidade à fratura .....	82
4.3	Confecção dos corpos-de-prova bicamada .....	83
4.3.1	Aplicação da porcelana feldspática VM9 sobre a zircônia .....	83
4.3.2	Aplicação da porcelana feldspática PM9 sobre a zircônia .....	86
4.3.3	Simulação da aplicação do glaze .....	87
4.3.4	Ensaio de resistência à flexão biaxial bicamada .....	88
4.4	Planejamento Experimental .....	90
5	RESULTADO .....	91
6	DISCUSSÃO .....	94
7	CONCLUSÃO .....	101
	REFERÊNCIAS .....	103

## **INTRODUÇÃO**

---

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por tratamentos estéticos tem levado à procura de novos materiais restauradores em substituição ao metal das restaurações indiretas<sup>20</sup>. Devido à biocompatibilidade e estética superior dos sistemas totalmente cerâmicos em relação às metalocerâmicas, cada vez mais este novo sistema tem sido utilizado e pesquisado<sup>13,14,22,47</sup>.

Na última década, o óxido de zircônio ( $ZrO_2$ ) de alta densidade estabilizado por ítrio (3Y-TZP), ou simplesmente “zircônia” como é coloquialmente chamada, foi introduzida no mercado odontológico devido às suas propriedades mecânicas, incomparáveis com as demais cerâmicas dentárias, bem como por sua excelente biocompatibilidade<sup>39,61</sup>. A zircônia é um material polimórfico que se apresenta em 3 diferentes fases: tetragonal, monoclinica e cúbica. Em temperatura ambiente, a zircônia pura encontra-se na fase monoclinica, na qual é mais susceptível à degradação em ambiente bucal. Assim, adiciona-se cerca de 3% de ítrio, estabilizando-a na fase tetragonal, mais estável quimicamente. Além de sua alta resistência à flexão (900-1200 MPa) e alta tenacidade à fratura ( $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )<sup>63</sup> comparada com outras cerâmicas dentais, a zircônia apresenta uma transformação martensítica (mudança de fase tetragonal para monoclinica), que ocorre pontualmente em resposta a propagação de trincas. Essa transformação é acompanhada de um aumento de cerca de 3-4% em volume, o que gera um estresse de compressão na trinca em desenvolvimento, diminuindo sua propagação e aumentando a tenacidade à fratura<sup>20,60,62</sup>. Esse fenômeno é conhecido por tenacificação por transformação de fase.

Graças às suas excelentes propriedades mecânicas, é permitido seu uso em próteses fixas múltiplas de dentes posteriores<sup>2,3,47</sup>, nas quais outros sistemas cerâmicos são restritos, tais como aqueles a base de leucita, dissilicato de lítio e óxido de alumínio infiltrado por vidro. No entanto, devido à baixa translucidez, é recomendado o recobrimento da zircônia com porcelanas feldspáticas<sup>2,20,23,55,61</sup>, amplamente reconhecidas pelas qualidades estéticas. Outra alternativa consiste no uso da zircônia monolítica associada a técnicas de pigmentação, para mimetização das estruturas dentais.

A porcelana pode ser aplicada convencionalmente, ou seja, aglutinando-se o pó no líquido até formar uma massa que é aplicada sobre o coping com o auxílio de um

pincel e levado ao forno para ciclo de sinterização. Outro método usa porcelana prensável sobre a zircônia, lançando mão da técnica da cera perdida. O padrão de cera incluído em revestimento é levado ao forno para eliminação e expansão do refratário e transferido para outro forno para injeção e prensagem, que é programado para atingir temperaturas predeterminadas, com o objetivo de plastificar uma pastilha de porcelana e injetá-la por pressão no molde de revestimento. Nesta técnica, teoricamente, os efeitos da porosidade interna são minimizados<sup>7,31</sup>, melhorando a performance clínica<sup>3</sup>, pois o material apresentaria estrutura mais homogênea. No entanto, a reprodução das características ópticas do dente fica mais complicada, visto que a porcelana prensada é monocromática, ficando na dependência de técnicas de pintura extrínseca para melhorar a estética da peça protética.

Enquanto a fratura coesiva da porcelana de cobertura é tida como uma causa de insucesso, a fratura da zircônia é incomum<sup>48</sup>, com taxas de sobrevivência de até 97,8% após cinco anos<sup>47</sup>, problemas como pequenos lascamentos e fraturas de corpo da porcelana de cobertura têm ocorrido com relativa frequência<sup>4,13,22,25,34,39,44,45,48,51,54,59</sup>. Em um estudo prospectivo de 5 anos, próteses com infraestrutura em zircônia e recobrimento com porcelana de cobertura apresentaram taxa de sobrevivência de 73,9% após cinco anos, sendo que o lascamento da porcelana de cobertura foi encontrado em 15,2% dos casos como causa do insucesso<sup>47</sup>. Algumas hipóteses como carga excessiva devido a um contato prematuro<sup>23</sup>, resistência de união insuficiente<sup>23</sup> e formação de tensão residual excessiva durante o resfriamento da porcelana de cobertura<sup>8,9,20,23,25,27,38,39,56,59</sup>, surgiram para explicar a falha. Outros ainda alegam que as falhas ocorrem por suporte inadequado oferecido pela zircônia a porcelana de cobertura ou mesmo devido às propriedades mecânicas insuficientes do material de recobrimento<sup>27,47</sup>.

Em relação aos contatos prematuros, uma minuciosa e correta análise clínica pode evitá-los. Com relação à resistência de união entre a porcelana de cobertura e a zircônia foram encontrados valores aceitáveis<sup>1,29</sup>. Em razão disso, tem sido observado que ocorre predominantemente falha coesiva da porcelana de cobertura. Essa fratura ocorre geralmente na porcelana adjacente a interface zircônia/porcelana, e não na interface, o que se classificaria como uma fratura adesiva<sup>27</sup>. A fratura coesiva da porcelana indica que os estresses residuais de origem térmica devem afetar a porcelana de cobertura. Supõe-se que as tensões residuais podem ocorrer devido à incompatibilidade térmica do coeficiente de expansão térmica (CET) entre zircônia e

porcelana de cobertura, ou por uma inadequada taxa de resfriamento<sup>24,38,55,56</sup>. A sinterização da porcelana ocorre em temperaturas entre 850 °C e 1000 °C, nas quais encontra-se em fase plástica. Durante o resfriamento, ao passar pela temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), a cerâmica sofre uma mudança do estado plástico para o sólido. A partir disso, as tensões residuais térmicas geradas devido às diferenças entre os CET da zircônia e da porcelana de cobertura e pelos gradientes térmicos não podem mais ser aliviadas pela fluidez plástica, porque a viscosidade está muito aumentada<sup>24</sup>. Assim, estresses residuais ficam retidos devido a contração não uniforme que ocorre da superfície para o centro<sup>25,38</sup>. Devido ao efeito de têmpera, estresses residuais são de compressão na superfície da porcelana, diminuindo a magnitude com a profundidade e sendo influenciado pela taxa de resfriamento a partir da  $T_g$ <sup>38</sup>. Estas tensões podem gerar desde a deformação da peça protética e aumento da possibilidade de fratura durante a mastigação até o lascamento imediato ou tardio da porcelana de cobertura<sup>16,17</sup>. Os estresses são aliviados sempre que um novo ciclo de sinterização se inicia, uma vez que a porcelana atinge a fase plástica novamente. Assim, os estresses residuais finais são referentes ao resfriamento do último ciclo de sinterização, ou seja, do glazeamento.

Nas metalocerâmicas, a ocorrência de lascamentos é significativamente menor, apesar de as porcelanas para metalocerâmica apresentarem valores de resistência similares aos das porcelanas para zircônia<sup>5</sup>, o que poderia indicar que a resistência das porcelanas de cobertura não é um fator limitante para a longevidade clínica destes sistemas totalmente cerâmicos<sup>23</sup>. Assim, o que varia de um sistema a outro são as propriedades térmicas dos materiais metálicos e cerâmicos da infraestrutura. Os gradientes térmicos são determinados pela taxa de resfriamento, espessura do material e condutividade térmica dos materiais envolvidos. A zircônia e a porcelana de cobertura apresentam baixos valores de condutividade térmica (2 W/mK e 2,39 W/mK, respectivamente), quando comparada a outros materiais como ligas metálicas (300 W/mK)<sup>29</sup>, gerando gradientes térmicos diversos, especialmente em seções mais espessas submetidas a um resfriamento rápido, o que leva a formação demais tensões residuais<sup>54</sup>. O máximo estresse desenvolvido consiste na combinação de tensões induzidas pela incompatibilidade de CET entre a zircônia e a porcelana e de tensões residuais por resfriamento<sup>59</sup>.

Sabe-se que as cerâmicas são mecanicamente mais tolerantes a tensões compressivas do que a tensões de tração. Nos sistemas cerâmicos, a porcelana de cobertura apresenta CET ligeiramente menor que o da infraestrutura, favorecendo uma

ligeira compressão da camada superficial, o que melhora o desempenho da porcelana<sup>2,20,23,24,29,54</sup>. Fisher et al.<sup>24</sup> afirmaram que um CET da porcelana muito menor que o da zircônia leva a uma resistência à fratura diminuída, que pode ser interpretada como um excessivo estresse de compressão na porcelana de cobertura. Por outro lado, um CET muito maior leva a estresse de tração na porcelana e falha prematura ou mesmo delaminação espontânea. Ainda confirmaram a teoria de que a porcelana de cobertura deve ter CET ligeiramente menor que o da infraestrutura para sistemas totalmente cerâmicos<sup>24</sup>.

Outro fator que chama a atenção é a falta de informação precisa com relação à taxa de resfriamento ideal do último ciclo de sinterização (glaze) para essas cerâmicas, se rápida ou lenta, sendo um ponto de intensa controvérsia na literatura, conforme citado nos estudos de Almeida-Júnior et al.<sup>6</sup>. Alguns artigos recentes indicam o resfriamento lento, com o intuito de se diminuir o gradiente térmico, o que diminuiria o estresse residual gerado<sup>59</sup>. De acordo com Rues et al.<sup>46</sup>, o resfriamento lento seria indicado para se aumentar a resistência à fratura. No entanto, estas taxas não são bem estabelecidas. Göstemeyer et al.<sup>25</sup> afirmam que ainda não foram determinadas taxas de resfriamento precisas, apenas recomendando que a restauração permaneça durante a fase de resfriamento no interior da câmara do forno, pois assim impede-se o risco de qualquer choque térmico por oscilações de temperatura externas, pois este procedimento anularia as tensões residuais no interior da restauração. Afirmam ainda que o resfriamento lento deveria ser indicado, pois permite um maior tempo para que as tensões residuais geradas no material sejam liberadas pela fluidez plástica<sup>25</sup>. Swain<sup>54</sup>, em sua análise teórica identificou a importância da taxa de resfriamento, espessura e compatibilidade térmica no desenvolvimento de estresse residual, concluindo que espessas camadas de porcelanas de cobertura nas infraestruturas com baixa condutibilidade térmica, como a zircônia, podem gerar altos estresses de tração na porcelana, podendo resultar em crescimento instável de trinca ou lascamento. Guazzato et al.<sup>27</sup> verificaram a incidência de fraturas espontâneas e fratura coesiva da porcelana de cobertura aumentada com o resfriamento mais rápido e com a espessura aumentada dos corpos-de-prova de três grupos de combinações porcelana/zircônia. Zhang et al.<sup>64</sup> concluíram que desde que a resistência à flexão da zircônia é maior que o da porcelana de cobertura, em um resfriamento rápido, um corpo-de-prova mais espesso pode gerar estresse térmico e fraturar mais facilmente. Belli et al.<sup>10</sup>, em 2013, observaram que o resfriamento lento (abertura do forno em 10% para que resfriasse até

200 °C com taxa de resfriamento de 30°C/min) resultou em ciclos de fadiga estatisticamente maiores apenas para coroas recobertas com VM9 em relação ao resfriamento rápido (abertura imediata do forno no término de sua queima, expondo as coroas em contato com o ar ambiente com taxa de resfriamento de 600 °C/min), sendo recomendado pelos autores em casos onde se tem maior diferença de CET com a zircônia.

Embora o resfriamento lento tenha sido cada vez mais indicado, mais estudos são necessários para a definição de um correto protocolo. Almeida-Júnior et al.<sup>6</sup>, em 2013, observaram que o resfriamento rápido (remoção imediata do forno seguida de jatos de ar) gerou valores significativamente maiores de resistência à flexão, enquanto que o resfriamento lento (dentro do forno desligado) pareceu afetar a resistência à flexão da porcelana de cobertura e sua adesão com zircônia, o que foi atribuído ao estresse de compressão gerado na porcelana de cobertura sob resfriamento rápido, que pode melhorar a resistência da superfície e desenvolver altos estresses de tração na interface zircônia/porcelana, levando a uma maior predominância de falha adesiva. No entanto, a confiabilidade estrutural dos espécimes com resfriamento rápido foi ligeiramente menor do que os resfriados de modo normal e lento. Mainjot et al.<sup>42</sup>, em 2012 observaram que o resfriamento lento (resfriamento a uma taxa de 2°C/min até a temperatura ambiente em um forno especial) promoveu o desenvolvimento de estresse de tração interior, exceto para a amostra com 3 mm de espessura de zircônia. Na presente configuração, o resfriamento lento agravou o efeito negativo da espessura da infraestrutura. Embora minimize os efeitos dos gradientes térmicos, os estresses residuais gerados pelo resfriamento lento mostraram uma tendência de ser mais de tração do que os que foram resfriados de maneira clássica (abertura do forno a 900 °C aguardando o resfriamento até a temperatura ambiente e removendo o espécime da manta a 200°C). Em relação a resistência adesiva, Göstemeyer et al.<sup>25</sup> observaram uma diminuição com o resfriamento lento (resfriamento da temperatura de sinterização até a  $T_g$  em 5 minutos dentro do forno), indicando que esta taxa pode levar a risco de delaminação neste sistema totalmente cerâmico. Os autores associam o aumento da resistência adesiva no resfriamento rápido (remoção imediata do forno após sinterização para resfriar em ar ambiente) com um aumento da resistência a deformação flexural do espécime devido aos estresses de compressão gerados, que protegem a adesão entre infraestrutura e material de cobertura. Segundo Komine et al.<sup>34</sup>, a duração do resfriamento da temperatura de queima até a temperatura ambiente pode afetar a

resistência adesiva da porcelana de cobertura com a zircônia dependendo da porcelana utilizada. Em seus estudos, a porcelana contendo leucita apresentou uma condição da interface significativamente superior para o resfriamento lento (remoção do forno após 4 minutos) quando comparado ao rápido (remoção imediata do espécime do forno e resfriamento na temperatura ambiente), enquanto que a resistência adesiva da porcelana que apresentava o cristal sanidina não foi afetada por variações nas taxas de resfriamento. Esta diferença pode ser atribuída à cristalização da porcelana de cobertura, visto que a sanidina, que tem um CET baixo, apresenta fase estável nas temperaturas de queima da porcelana, ao contrário da leucita, que não tem fase estável nessa situação<sup>34</sup>.

No entanto, embora o resfriamento lento venha sendo mais recomendado, não foi encontrado estudo que avalie o comportamento de porcelanas prensáveis frente a diferentes taxas de resfriamento na fase de glaze, uma vez que seu primeiro resfriamento necessariamente é lento, uma vez que ocorre no interior do bloco de revestimento, que não pode ser resfriado de forma rápida, sob o risco de fratura da cerâmica. Assim, julgou-se oportuno avaliar o efeito da taxa de resfriamento lento ou rápido da última etapa da aplicação (glaze) na resistência à flexão biaxial de estruturas de zircônia revestida com porcelana convencional (VM9- Vita) ou prensada (PM9 – VITA).



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Partindo-se do pressuposto de que taxas de resfriamento lento produzem aumento na expansão térmica das porcelanas dentais, Mackert, Evans<sup>37</sup>, em 1991 buscaram determinar se o aumento no coeficiente de expansão térmica poderia estar atribuído a cristalização de leucita adicional durante o resfriamento lento da porcelana. Seis porcelanas comerciais (n= 8) foram analisadas por difração de raio-x. Os corpos-de-prova foram divididos em 2 grupos: resfriados pelo modo convencional (removidos do forno imediatamente da máxima temperatura até a temperatura ambiente); ou resfriados lentamente (desligando o forno e mantendo as amostras até o resfriamento). Foi observado aumento significativo ( $p < 0,05$ ) na quantidade de leucita nas porcelanas sob resfriamento lento. Os aumentos na fração de volume de leucita resultante do resfriamento lento variaram de 8,5% a 55,8%, com média de aumento de 26,9%. Devido à forte dependência do coeficiente de expansão térmica (CET) das porcelanas dentais do seu conteúdo de leucita, o resfriamento lento das restaurações metalocerâmicas poderiam produzir as mais variadas combinações metalocerâmicas, tidas como termicamente incompatíveis.

Quando a porcelana feldspática dental é resfriada, a leucita sofre uma transformação da fase cúbica para tetragonal, associada com 1,2% volume de contração. Esta contração leva a formação de microtrincas nos cristais e em torno dele, assim como o desenvolvimento de estresse de compressão tangencial em torno destes cristais. Partindo-se da hipótese de que a contração dos cristais de leucita poderia ser menor se não houvesse transformação cristalina, o que levaria a menor formação de microtrincas e minimização do estresse de compressão tangencial ao redor das partículas de leucita, Denry et al.<sup>19</sup>, em 1996, estabilizaram quantidades crescentes de leucita cúbica em porcelanas feldspáticas dentais reforçadas a base de leucita e avaliaram seus efeitos na resistência à flexão, assim como na microestrutura. Foram preparadas 8 composições de porcelana, misturando quantidades crescentes de leucita ou polucita com porcelana Optec HSP (Jeneric/Pentron Inc., Wallingford, CT). A análise de difração com raios-x mostrou que a quantidade de leucita estabilizada aumentou de acordo com a quantidade de polucita adicionado. A microestrutura dos corpos-de-prova das amostras contendo leucita em fase tetragonal foram caracterizadas pela presença de cristais de leucita geminados, enquanto que os não-geminados foram observados nos corpos-de-prova contendo leucita em fase cúbica. A avaliação da propagação de trinca revelou menor

propagação nos espécimes contendo leucita cúbica. A média de resistência à flexão biaxial para o grupo que correspondia a 22,2% em massa de polucita adicionada, queimada a 1038 °C, foi significativamente menor que no grupo controle. Esse mesmo grupo, queimado a 1150 °C exibiu média de resistência à flexão significativamente maior que todos os grupos, que não tiveram diferença significativa para o grupo controle. Aparentemente, o desenvolvimento de estresse de compressão tangencial em torno dos cristais de leucita quando resfriados é responsável por um significativo reforço das porcelanas feldspáticas.

Buscando-se determinar a relação entre a resistência à flexão de uma porcelana de cobertura (IPS-Classic Dentin; fabricante: Ivoclar, Liechtenstein) em intervalos térmicos entre sua temperatura de transição vítrea ( $T_g=581,7$  °C) e temperatura ambiente, Lenz et al.<sup>35</sup>, em 2002, utilizaram o ensaio de flexão em 3 pontos nas seguintes temperaturas: 20, 300, 400, 450, 500, 550 e 600 °C. No intervalo térmico  $20$  °C  $\leq T \leq 400$  °C a resistência à flexão diminuiu ligeiramente de 80 MPa para 73 MPa (aproximadamente 10% de redução). Um aumento da resistência à flexão para 98 MPa ocorreu em 500 °C, provavelmente devido ao fechamento de microtrincas da superfície por conta da fluidez plástica. Temperaturas acima de 500 °C revelaram uma diminuição da resistência à flexão novamente, apresentando 76 MPa na  $T_g$ , o que é aproximadamente 5% menor que a resistência à flexão à temperatura ambiente.

Isgro et al.<sup>31</sup>, em 2003, avaliaram o efeito de diferentes tratamentos de superfície na resistência do material de infraestrutura cerâmico e da porcelana de cobertura, tão bem como a influência da porcelana de cobertura na resistência de uma estrutura bicamada totalmente cerâmica. Cinquenta infraestruturas prensadas por calor (Carrara) e 30 discos de porcelana de cobertura (Carrara Vincent) foram confeccionados (17 mm de diâmetro e 2 mm de espessura). Para o grupo com material de infraestrutura, 20 discos foram selecionados e reduzidos para a espessura de 1 mm e foi aplicado 1 mm de porcelana. Estes espécimes foram divididos em 2 grupos de 10 cada. As 30 infraestruturas e 30 discos de porcelana de cobertura remanescentes foram divididas 3 grupos com mesmo tamanho de amostra ( $n=10$ ). Os grupos com material de infraestrutura foram preparados para teste com os seguintes tratamentos de superfície: jateamento, abrasão com broca diamantada, e glazeamento. Porcelanas de cobertura foram testadas: apenas sinterizada, abrasão com broca diamantada e com glaze. A resistência à flexão biaxial foi mensurada. Análise de duas variâncias foi utilizada ( $p<0,05$ ). Os discos de material de infraestrutura foram significativamente mais

resistentes que os discos de porcelana de cobertura para grupo com jateamento e grupo com abrasão ( $82 \pm 11$  MPa versus  $51 \pm 8$  MPa e  $93 \pm 14$  MPa versus  $60 \pm 6$  MPa, respectivamente). Para o tratamento com glaze, não houve uma diferença estatisticamente significativa entre infraestrutura ( $115 \pm 14$  MPa) e porcelana de cobertura ( $107 \pm 14$  MPa). Os monocamadas de material de infraestrutura foram significativamente mais resistentes ( $93 \pm 14$  MPa) que os bicamadas ( $72 \pm 19$  MPa), quando testados com infraestrutura em tração. Não houve diferença estatística entre monocamada ( $107 \pm 14$  MPa) e bicamada ( $105 \pm 16$  MPa) submetidos a glazeamento, com porcelana de cobertura testada em tração. Concluíram que o tratamento com glaze melhorou a resistência dos materiais testados, tão bem como a resistência de espécimes bicamada com a porcelana em tração. A porcelana de cobertura influenciou a resistência dos espécimes bicamada apenas quando a infraestrutura foi testada em tração.

Della Bona et al.<sup>18</sup>, em 2003, tiveram como objetivo avaliar a hipótese de que o módulo de Weibull das porcelanas é controlado principalmente pela confiabilidade estrutural da infraestrutura. Sete grupos de 20 corpos-de-prova em barra foram confeccionados nas dimensões de 25 mm de comprimento, 5 mm de largura de 1,2 mm de espessura. Os grupos foram: 1) IPS Empress para infraestrutura à base de leucita prensada; 2) IPS Empress 2 para infraestrutura à base de dissilicato de lítio prensada; 3) Evision para infraestrutura à base de lítio prensado, testado em ambiente úmido; 4) IPS Empress 2 para recobrimento; 5) Evision a base de lítio prensado, para infraestrutura, com espessura de 1,1 mm adicionado de 0,1 mm de glaze; 6) Evision a base de lítio prensado, para infraestrutura, com 0,8 mm de espessura, adicionado de 0,3 mm de porcelana de cobertura e 0,1 mm de glaze; 7) Evision a base de lítio prensado, para infraestrutura, testado em ambiente seco. Havia corpos-de-prova monocamada (grupos 1, 2, 3, 4 e 7), bicamada (grupo 5) e tricamada (grupo 6). Os corpos-de-prova foram testados em um ensaio de flexão em 4 pontos com aplicação de carga na velocidade de 0,5 mm/min, enquanto imersos em água destilada à 37 °C, exceto o grupo 7, que foi testado em ambiente seco. A superfície das fraturas foi examinada por microscopia eletrônica de varredura para determinar o modo da fratura baseado na sua origem e princípios fractográficos. ANOVA e teste de Duncan não mostraram diferenças insignificantes entre as médias de valores de resistência à flexão dos Grupos 2, 3, 5 e 6 ou entre grupos 1 e 4 ( $p > 0,05$ ). No entanto, diferenças estatisticamente significantes foram encontradas entre o grupo testado em ambiente seco (grupo 7) e os

grupos testados em ambiente úmido (Grupos 1 a 6). Glazeamento não teve efeito significativo na resistência flexural e módulo de Weibull. A resistência e módulo de Weibull do grupo 3 foram similares aos dos grupos 5 e 6. Concluiu-se que a confiabilidade estrutural deste sistema totalmente cerâmico é controlada principalmente pela confiabilidade estrutural do material de infraestrutura.

Taskonak et al.<sup>57</sup>, em 2005, testaram a hipótese de que um estresse residual global dentro da superfície pode ser o responsável pela fragmentação da porcelana de cobertura em prótese fixa com infraestrutura em dissilicato de lítio. Para isso, utilizaram corpos-de-prova bicamada e monocamada de Empress 2 para infraestrutura (E2C), uma infraestrutura cerâmica experimental (EXC), uma porcelana de cobertura Eris (ERV), e uma porcelana de cobertura Empress 2 (E2V), fazendo as seguintes combinações (ERV; E2V; E2C/E2V; E2C/ERV; EXC/E2V; EXC/ERV). O estudo da mecânica da fratura em 4 passos foi utilizada para analisar a tensão residual nos corpos-de-prova (1- Indentação dos corpos-de-prova para comparar os tamanhos das trincas induzidas; 2- Medida da carga de fratura, cálculo da resistência à flexão e comparação entre monocamadas e bicamadas; 3- Cálculo da tenacidade à fratura dos bicamadas e determinação da tenacidade à fratura dos monocamadas; 4- Cálculo do estresse residual nos corpos-de-prova bicamadas utilizando equação de mecânica da fratura. Difração por Raios-X foi utilizado para avaliar a fase cristalina nas cerâmicas sinterizadas. Os coeficientes de expansão térmica foram medidos por dilatométrica. Um aumento estatístico significativo foi encontrado na média de resistência à flexão dos corpos-de-prova bicamada comparado com os monocamadas. Houve diferença estatisticamente significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre a média do tamanho (longitudinal e transversal) das trincas nos bicamadas, o que indica a existência de estresse residual. Nos monocamadas não houve diferença estatisticamente significativa ( $p > 0,05$ ). Estresse residual global na porcelana de cobertura, calculado usando equação de mecânica de fratura, foi determinado como sendo o responsável pelo aumento na resistência dos corpos-de-prova bicamadas. No entanto, a tração sofrida associado ao estresse global de compressão também foi a principal causa da fragmentação da porcelana de cobertura observada. A resistência à flexão e a tenacidade à fratura dos sistemas totalmente cerâmicos são controlados principalmente pela porcelana de cobertura, quando uma trinca crítica se inicia em sua superfície. Neste estudo, sem exceções, a origem da fratura de todos corpos-de-prova ocorreu na superfície que estava em tração e não na interface infraestrutura/porcelana de cobertura.

White et al.<sup>61</sup>, em 2005, investigaram a resistência à flexão de 8 configurações de barras de zircônia e porcelana feldspática (Lava Ceram para cobertura), sendo uma com apenas zircônia e uma com apenas porcelana. O módulo de elasticidade dos materiais foi mensurado pelo método acústico e a resistência à flexão foi medida através do ensaio de flexão em 3 pontos. Barras com a porcelana na superfície de tração (porcelana para baixo) registraram média de resistência à flexão de 77 a 85 MPa enquanto as que continham zircônia na superfície de tração (zircônia pra baixo) registraram uma média de 636 à 786 MPa. A propagação da trinca geralmente envolveu a interface porcelana zircônia bem como o corpo da porcelana e a zircônia. Os módulos de elasticidade encontrados foram  $70,7 \pm 0,6$  GPa e  $224 \pm 0,8$  GPa, para porcelana de cobertura e zircônia, respectivamente. Nos espécimes que continham a porcelana sob tração, a propagação de trinca ocorreu lateralmente até alcançar a zircônia. Isso pode levar a duas explicações: maior habilidade da zircônia em resistir à propagação de trincas, ou pode indicar pobre adesão da zircônia à porcelana.

Aboushelib et al.<sup>1</sup>, em 2005, avaliaram a resistência de união entre infraestrutura e material de revestimento e a resistência coesiva de 3 sistemas totalmente cerâmicos: duas cerâmicas para CAD-CAM (Cercon e Vita Mark II) e um sistema prensável (IPS Empress 2) para técnica de revestimento. Dois tipos de tratamento de superfície foram utilizados para o material de infraestrutura e diferentes porcelanas de cobertura com diferentes coeficientes de expansão térmica (CET) foram aplicados. Os corpos-de-prova foram confeccionados, polidos e recobertos com porcelanas de cobertura de acordo com o fabricante. Foi também utilizada uma porcelana de cobertura experimental com CET maior. As microbarras obtidas foram submetidas ao ensaio de microtração, para análise da resistência de união. Os resultados obtidos foram analisados usando-se ANOVA. Análise de elemento finito e microscopia eletrônica de varredura na superfície de fratura foram executados. Os materiais de infraestrutura foram significativamente mais resistentes (maior resistência coesiva) que as porcelanas de cobertura, enquanto os corpos-de-prova bicamada foram estatisticamente comparáveis. O polimento da superfície da infraestrutura não teve efeito na resistência de união com a porcelana de cobertura. Fraturas tanto no material de infraestrutura como no de revestimento foram observados quando se utilizou da porcelana de cobertura experimental com CET aumentado. A microscopia eletrônica de varredura e a análise de elemento finito demonstraram o padrão de fratura e o mecanismo da falha. Como a resistência de união entre infraestrutura e material de revestimento é um dos pontos mais fracos dos

sistemas totalmente cerâmicos, conclui-se que uma baixa resistência de união entre os materiais pode levar ao lascamento da porcelana de cobertura.

De Hoff et al.<sup>16</sup>, em 2006, estudaram estresses residuais em uma prótese fixa de 3 elementos em 4 combinações totalmente cerâmicas: 1) IPS Empress 2, para recobrimento e Empress 2, para infraestrutura; 2) IPS Eris<sup>TM</sup>, uma porcelana de cobertura de baixa fusão contendo fluorapatita e infraestrutura em Empress 2; 3) Porcelana de cobertura IPS Empress 2 e uma cerâmica experimental a base de dissilicato de lítio para infraestrutura; 4) IPS Eris<sup>TM</sup> para cobertura e uma cerâmica experimental a base de dissilicato de lítio para infraestrutura.. Um modelo de elemento finito em 3D foi construído a partir de dados obtidos por um scanner e os cálculos foram feitos para os 4 sistemas. O máximo estresse residual das porcelanas de cobertura para as combinações apresentadas foram as seguintes: (1) 77 MPa, (2) 108 MPa, (3) 79 MPa, e (4) 100 MPa. Estes estresses foram relativamente altos comparados à resistência à flexão destes materiais. Em todos os casos, o estresse residual máximo na infraestrutura foi muito inferior à resistência à flexão destes materiais. Os autores concluíram que altos estresses residuais nos sistemas totalmente cerâmicos utilizados em próteses fixas podem colocar estes sistemas em perigo de falha sob cargas oclusais na cavidade bucal.

Aboushelib et al.<sup>3</sup>, em 2006, investigaram a resistência de união entre um tipo de zircônia e algumas marcas comerciais de porcelana de cobertura. Os espécimes de zircônia foram recobertos com 2 porcelanas de cobertura por prensagem (SakuraInteraction e uma experimental) e 5 convencionais (Ceram S, Ceram Express, Rondo Dentine, Rondo Shoulder e Lava Dentine). Foram confeccionados 3 discos bicamada de cada grupo e a resistência de união testada por microtração em máquina de testes universal. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para classificar os padrões de fratura, enquanto que a interface foi avaliada por difração de raio-x. A resistência à microtração das porcelanas de cobertura Rondo Dentine e Lava Dentine foram significativamente maiores que as outras porcelanas de cobertura testadas. Além do mais, os sistemas recobertos com Rondo Dentine e Ceram Express foram significativamente mais resistentes que os outros sistemas bicamadas testados. A análise através de MEV da interface zircônia/porcelana de cobertura revelou que defeitos estruturais podem interromper o contato entre zircônia e a porcelana de cobertura, além de mostrar que as porcelanas prensadas tiveram melhor contato com a zircônia. Ainda na análise em MEV, as 2 porcelanas prensadas e Rondo Dentine

falharam totalmente de forma coesiva na porcelana de cobertura enquanto que os demais grupos testados tiveram maior porcentagem de falha interfacial. A difração de raios-x na interface zircônia/porcelana de cobertura revelou que alguns elementos como sílica, sódio, alumínio e potássio podem se difundir pela zircônia. Ainda indicou que a concentração destes elementos diminui gradualmente até a profundidade de 8-10 mm na zircônia. Conclui-se que a utilização de porcelanas de cobertura mais resistentes que tenham boa união com a zircônia pode reduzir as chances de lascamento e fratura das próteses deste sistema totalmente cerâmico.

Em 2007, Sailer et al.<sup>47</sup> determinaram as taxas de sucesso de próteses fixas posterior com infraestrutura em zircônia depois de 5 anos de observação clínica. Vinte e sete pacientes com 33 próteses fixas com infraestrutura em zircônia foram examinadas depois de um período médio de observação de  $53.4 \pm 13$  meses. Onze pacientes com 17 próteses fixas foram perdidos no acompanhamento futuro. Após 3 anos de retorno, 7 próteses de 7 pacientes tiveram que ser trocadas porque não estavam clinicamente aceitáveis devido a complicações biológicas e técnicas. Após 5 anos de observação clínica, 12 próteses de 12 pacientes foram substituídas. Uma prótese de 5 elementos fraturou como resultado de trauma após 38 meses. As taxas de sucesso para a infraestrutura em zircônia foi de 97,8%. No entanto, a taxa de sobrevivência foi de 73,9% devido a outras complicações. Cáries secundárias foram encontradas em 21,7% das próteses fixas e o lascamento da porcelana de cobertura em 15,2%. Concluíram que a zircônia oferece estabilidade suficiente como material de infraestrutura para próteses fixas posteriores contendo de 3 a 4 elementos e pode ser utilizada para substituição de molares e pré-molares perdidos. A adaptação da infraestrutura e porcelanas de cobertura, no entanto, devem ser melhoradas.

Sailer et al.<sup>48</sup>, em 2007, fizeram uma revisão sistemática de literatura com o objetivo de avaliar as taxas de sobrevivência e incidências de complicações nas próteses fixas confeccionadas com sistemas totalmente cerâmicos. Além disso, buscaram comparar com as próteses fixas confeccionadas com sistemas metalocerâmicos. Foi utilizado o sistema eletrônico MEDLINE e Dental Global Publication Research System (Dental GPRS), além da pesquisa manual para procurar por estudos prospectivos e retrospectivos de sistemas totalmente cerâmicos e metalocerâmicos com uma média de no mínimo 3 anos de acompanhamento. A avaliação dos estudos identificados e a abstração de dados foi realizada de forma independente por 3 revisores. As taxas de falha foram analisadas utilizando modelos de regressão de Poisson para obter

estimativas de proporções de longevidade de 5 anos. Taxas de sobrevivência em 5 anos foram significativamente mais baixas para os sistemas totalmente cerâmicos quando comparados as próteses metalocerâmicas. A razão mais frequente para falha das próteses fixas com de cerâmicas vítreas e cerâmicas infiltradas com vidro foi a fratura na prótese, seja na infraestrutura ou na porcelana de cobertura. No entanto, quando a zircônia foi utilizada como material de infraestrutura, as razões para falha foram principalmente complicações biológicas (cáries e perda de vitalidade pulpar) e técnicas (falta de retenção).

Pjetursson et al.<sup>44</sup>, em 2007, avaliaram as taxas de sobrevivência de 5 anos de coroas unitárias totalmente cerâmicas através de uma revisão sistemática de literatura e compararam as taxas de sobrevivência com as coroas metalocerâmicas. Além disso, descreveram a incidência de complicações biológicas e técnicas. Foi utilizado o sistema eletrônico MEDLINE e Dental Global Publication Research System (Dental GPRS), além da pesquisa manual para procurar por estudos prospectivos e retrospectivos de coroas totalmente cerâmicas e metalocerâmicas com uma média de no mínimo 3 anos de acompanhamento. Os pacientes tinham que ter sido examinados clinicamente na visita de acompanhamento. A avaliação dos estudos identificados e a abstração de dados foi realizada de forma independente por 2 revisores. As taxas anuais de falha foram analisadas utilizando modelos de regressão de Poisson para obter estimativas de proporções de longevidade de 5 anos. Em meta-análise, as taxas de sobrevivência de 5 anos foi estimada em 93,3% para coroas totalmente cerâmicas e 95,6% para metalocerâmicas. Todas as coroas totalmente cerâmicas foram analisadas de acordo com o material utilizado. Coroas com alumina (Procera®) apresentaram as mais altas taxas de sobrevivência de 5 anos, sendo de 96,4%, acompanhada de cerâmicas vítreas reforçadas (Empress) e coroas InCeram, com taxas de 95,4% e 94,5%, respectivamente. Um taxa de sobrevivência significativamente menor de 87,5% foi calculada para coroas com cerâmica vítrea após 5 anos. Todas as coroas totalmente cerâmicas foram também agrupadas e analisadas conforme a localização na boca. Em todos os casos, coroas posteriores apresentaram menores taxas de sobrevivência. Além disso, para coroas de cerâmica vítrea (84,4%) e coroas InCeram (90,4%), esta diferença alcançou significância estatística. Baseado nesta revisão sistemática, coroas totalmente cerâmicas, quando em dentes anteriores, apresentaram taxas de sobrevivência semelhantes as coroas metalocerâmicas.

Fisher et al.<sup>23</sup>, em 2008, tiveram como objetivo avaliar a resistência à flexão das porcelanas de cobertura. Para isso, utilizaram de 10 diferentes porcelanas de cobertura para zircônia (grupo teste) e 3 para metal (grupo controle). O ensaio de flexão em 3 pontos no grupo teste variou de  $77,8 \pm 8,7$  MPa e  $106,6 \pm 12,5$  MPa, sem nenhuma diferença estatística significativa. No grupo controle variou de  $93,3 \pm 13,5$  MPa a  $149,4 \pm 20,5$  MPa. No ensaio de flexão em 3 pontos do grupo teste os valores de resistência à flexão foram similares às duas porcelanas do grupo controle. A resistência à flexão no teste biaxial variou entre  $69,1 \pm 4,8$  MPa e  $101,4 \pm 10,5$  MPa no grupo teste, tendo 3 grupos homogêneos. No grupo controle, variou sua resistência à flexão entre  $93,4 \pm 10,0$  MPa e  $141,2 \pm 11,6$  MPa. No ensaio de flexão em 4 pontos, os valores de resistência à flexão variaram de  $59,5 \pm 6,2$  MPa à  $89,2 \pm 9,5$  MPa, tendo 5 grupos homogêneos. No grupo controle, os valores variaram de  $82,7 \pm 8,5$  MPa a  $116,9 \pm 9,8$  MPa. O fato de os valores de resistência à flexão encontrados para as porcelanas de cobertura para zircônia serem da mesma ordem dos valores encontrados para porcelanas para infraestrutura em metal podem ser que a resistência das porcelanas de cobertura não é um fator limitante para a longevidade clínica destes sistemas totalmente cerâmicos. Além disso, concluiu-se que o ensaio de flexão em 4 pontos apresentou valores significativamente menores que os obtidos no ensaio em 3 pontos. O ensaio biaxial apresentou valores de resistência à flexão, em geral, variando entre os valores encontrados no ensaio em 4 pontos e o ensaio em 3 pontos.

De Hoff et al.<sup>17</sup>, em 2008, mostraram que corpos-de-prova bicamada cilíndricos e esféricos fornecem confirmação do estresse de incompatibilidade térmica que foi predito por análise de elemento finito. Neste estudo, recobriram-se infraestruturas cerâmicas prensadas em corpos-de-prova cilíndricos e esféricos com 4 porcelanas que apresentavam evidente incompatibilidade térmica e 4 porcelanas com compatibilidade térmica. Quando esferas foram utilizadas como infraestrutura, 100% dos espécimes incompatíveis termicamente falharam, enquanto apenas 4% dos compatíveis termicamente desenvolveram falha após a queima. A análise de elemento finito confirmou que falhas foram consistentemente ligadas aos altos estresses residuais, enquanto baixos valores de estresse foram encontrados naqueles que não falharam. O resultado deste estudo indica que o uso de espécimes cilíndricos e esféricos é uma forma simples e confiável de ser utilizada para identificar combinações altamente incompatíveis termicamente.

Donovan<sup>22</sup>, em 2008, descreveu fatores que são essenciais para o sucesso quando se utiliza de sistemas totalmente cerâmicos. Atenção precisa para os detalhes da preparação do dente, design e localização da margem cervical, gerenciamento de tecidos moles e moldagem são cruciais para o sucesso. Corretos protocolos de cimentação são importantes para o sucesso à longo prazo. Ainda sugeriu o uso rotineiro de placas oclusais noturnas e que restaurações totalmente cerâmicas deveriam ser indicadas de acordo com as necessidades dos pacientes. Evidências têm revelado que o sistema totalmente cerâmico não deveria ser utilizado em região de molares devido a alta probabilidade de fracasso. No entanto, relatou que alguns sistemas podem fornecer resultados estéticos superiores comparados com próteses metalocerâmicas e coroas com zircônia como infraestrutura são os sistemas totalmente cerâmicos mais resistentes.

Taskonak et al.<sup>56</sup>, em 2008, tiveram como objetivo testar a hipótese de que o estresse residual em sistemas zircônia/porcelana de cobertura pode ser modificado através de tratamentos térmicos acima e abaixo da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da porcelana de cobertura. Discos de zircônia (Lava 3M ESPE) foram recobertos com porcelana Lava Ceram, obtendo dimensão final de 16 mm de diâmetro e 1,6 mm de espessura, sendo 0,6 mm de espessura de porcelana. Os grupos foram tratados termicamente de 4 maneiras diferentes: 40 °C abaixo, 20 °C e 40 °C acima e na  $T_g$ , e resfriados de forma rápida ou lenta. Um grupo monolítico de porcelana foi utilizado como controle. Os espécimes foram ensaiados por resistência à flexão biaxial. Estresse residual foi calculado usando teoria de mecânica da fratura. Os grupos com resfriamento rápido apresentaram estresses significativamente maiores que os grupos resfriados lentamente para todos os tratamentos térmicos. O grupo que foi tratado 20 °C acima da  $T_g$  teve estresse de falha significativamente maior que os outros grupos para o resfriamento rápido, mas não para o resfriamento lento. Estas variações mostram que o estresse residual pode ser aumentado ou diminuído utilizando diferentes tratamentos térmicos nas composições zircônia/porcelana de cobertura. O resfriamento rápido gerou estresses residual de compressão e o resfriamento lento gerou estresse residual de tração. O maior estresse de compressão gerado foi no grupo tratado termicamente 20 °C acima da  $T_g$  e resfriado rapidamente, enquanto que o maior estresse de tração foi observado no grupo que foi tratado termicamente na  $T_g$  e resfriado lentamente. Estresses residuais podem ser modificados utilizando o comportamento viscoelástico de relaxamento dos materiais vítreos, como a porcelana.

Uma tendência geral dos sistemas totalmente cerâmicos é usar uma porcelana de cobertura com coeficiente de expansão térmica (CET) ligeiramente menor que o da infraestrutura, para que ocorra um estresse de compressão na porcelana de cobertura, visando aumentar sua resistência. Esta técnica é bem aceita para o sistema metalocerâmico. No entanto, existem algumas preocupações em relação ao uso deste conceito para o sistema totalmente cerâmico. Assim, Aboushelib et al.<sup>2</sup>, em 2008 buscaram determinar a influência de um pré-estresse, ocorrido durante a variação do coeficiente de expansão térmico, na performance mecânica deste sistema. Para isso, utilizaram duas marcas comerciais de porcelana de cobertura com CET menor que o da zircônia (NobelRondo zirconia<sup>TM</sup> e Lava Ceram<sup>TM</sup>) e uma porcelana de cobertura experimental com CET idêntico ao da zircônia. Os discos bicamada foram submetidos ao ensaio de flexão biaxial com a porcelana de cobertura em tração. Os estresses durante a aplicação da carga e durante a variação do CET foram calculados matematicamente usando análise fractográfica, e análise de elemento finito. A estatística foi realizada através de ANOVA e de teste de Tukey. A maior carga aplicada até fratura foi obtida com a porcelana de cobertura experimental (64 N), onde a incompatibilidade térmica foi mínima. Para as duas porcelanas de cobertura comerciais a magnitude da incompatibilidade localizada na interface zircônia-porcelana (42 MPa) excedeu a resistência de união entre os dois materiais, resultando em delaminação durante o teste (50 MPa). Dados da fractografia (dimensões e origem da trinca e carga para fratura) e da análise com elemento finito determinaram estresses devido à carga de fratura e estresse global devido à combinação linear da carga de fratura e incompatibilidade térmica de CETs. Nos discos preparados com as porcelanas de cobertura comerciais (que tem CET menor que o da zircônia), a origem da trinca foi na interface zircônia/porcelana, gerando delaminação. Já a porcelana experimental apresentou a origem da trinca na superfície inferior da porcelana. As duas porcelanas falharam com carga significativamente menor à porcelana experimental, indicando que a influência do pré-estresse na interface zircônia-porcelana em combinação com a carga aplicada resultou em falha de delaminação antes de os corpos-de-prova alcançarem sua carga de fratura teórica. Assim, concluiu-se que para sistemas totalmente cerâmicos é recomendado que a incompatibilidade térmica entre os materiais seja a mínima possível.

Guess et al.<sup>29</sup>, em 2008, avaliaram a resistência de união por cisalhamento entre 3 marcas comerciais de zircônia (Cercon Base, Vita In-Ceram YZ Cubes, DC-Zirkon) e as porcelanas de cobertura recomendadas pelos fabricantes (CerconCeramS, Vita VM9,

IPS e.max Ceram), assim como o efeito da termociclagem. Como grupo controle foi utilizado uma cerâmica para sistema metalocerâmico (Degudent U94, Vita VM13). Foram confeccionados 30 corpos-de-prova de cada grupo, sendo que 15 de cada sofreram termociclagem de 20000 ciclos, alternando entre 5 °C e 55 °C, com tempo de imersão de 45 segundos. Os corpos-de-prova fraturados foram avaliados microscopicamente para determinação do modo de fratura. As médias iniciais de resistência de união foram 12,5±3,2 MPa para Vita In-Ceram YZ Cubes/Vita VM9, 11,5±3,4 MPa para DC-Zirkon/IPS e.max Ceram, e 9,4±3,2 MPa para Cercon Base/CerconCeramS. Após a termociclagem, as médias foram de 11,5±1,7 MPa para DC-Zirkon/IPS e.max Ceram, 9,7±4,2 MPa para Vita In-Ceram YZ Cubes/Vita VM9, e 9,6±4,2 MPa para Cercon Base/CerconCeramS. Nenhuma diferença estatisticamente significativa foi encontrada entre as médias de resistência de união e termociclagem para os grupos totalmente cerâmicos. A média de resistência de união do grupo controle metalocerâmico foi significativamente maior que a os grupos totalmente cerâmicos (27,6±12,1MPa, 26,4±1,4MPa), independente da termociclagem, que também não apresentou diferença estatística. Os sistemas totalmente cerâmicos apresentaram fraturas tanto coesivas (na porcelana de cobertura), como adesivas na interface, enquanto que o sistema metalocerâmico apresentou predominantemente fratura coesiva. Microscopia eletrônica de varredura revelou porosidades na porcelana de cobertura e defeitos estruturais na interface zircônia/porcelana. Em comparação com o grupo metalocerâmico, adequados valores de resistência de união entre zircônias e as porcelanas de coberturas investigadas não puderam ser atingidas, o que sugeriu que mais estudos para o desenvolvimento e refinamento da interface zircônia/porcelana de cobertura precisam ser executados.

Zhang et al.<sup>64</sup>, em 2009, adotaram o método de elementos finitos (em 2D e 3D) para simular o processo de transiente de resfriamento desenvolvido em corpos-de-prova mono e bicamada da mais alta temperatura 900° C até a temperatura ambiente (25 °C). Foram utilizados diferentes métodos de resfriamento: rápido, normal e lento. Na simulação do transiente em 2D, o coeficiente de transferência de calor convectivo foi 95 W/m<sup>2</sup>·°C para o resfriamento rápido, 25 W/m<sup>2</sup>·°C para o resfriamento normal, e 4,2 W/m<sup>2</sup>·°C para resfriamento lento. Os coeficientes da análise em 3D foram 91 W/m<sup>2</sup>·°C para resfriamento rápido, 26 W/m<sup>2</sup>·°C para resfriamento normal e 4 W/m<sup>2</sup>·°C para o resfriamento lento. Com o resfriamento rápido, os corpos-de-prova demoraram 320 segundos para resfriar de 900 °C até 25 °C (temperatura ambiente), enquanto nos

resfriamentos normal e lento, gastaram 1510 segundos e 4300 segundos respectivamente. A  $T_g$  deslocou-se para uma temperatura maior no resfriamento rápido. Em contraste, com o processo de resfriamento lento se deslocou para uma menor temperatura, ou seja, a temperatura de transição vítrea das porcelanas não é única/constante. Os achados indicaram que as taxas de resfriamento são menores em discos de porcelana mais espessos, indicando que o coeficiente de transferência de calor por convecção em procedimentos de resfriamento não é único e constante. Desde que a resistência à flexão da zircônia é maior que o da porcelana de cobertura, em um resfriamento rápido, um corpo-de-prova mais espesso pode gerar estresse térmico e fraturar mais facilmente.

Fisher et al.<sup>24</sup>, em 2009, investigaram o efeito da incompatibilidade térmica na resistência ao cisalhamento das restaurações indiretas compostas de zircônia e porcelana de cobertura. Utilizaram-se 12 diferentes porcelanas de cobertura, sendo 10 indicadas para zircônia (Cerabien ZR, Creation ZI, IPS e.max, Initial ZR, LavaCeram, Rondo Zirconia, Triceram, Vintage, VM9, Zirox), uma para alumina (Allux) e uma para metalocerâmica (Reflex), sendo as duas últimas utilizadas com o intuito de se criar uma forte incompatibilidade térmica, visto que apresentam CET de 7,8 m/mK e 12,9 m/mK, respectivamente, que são valores discrepantes do da zircônia (10,8 m/mK). Cubos de zircônia Y-TZP polidos foram recobertos com essas porcelanas (n=10), A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) das porcelanas de cobertura e dos coeficiente de expansão térmica (CET) de todas as cerâmicas foi calculado (n=6). As análises estatísticas foram feitas com ANOVA e teste de post hoc Bonferroni ( $p < 0,05$ ). A resistência ao cisalhamento variou de  $21,9 \pm 6,2$  para Rondo Zirconia a  $31,0 \pm 7,1$  MPa para Triceram. A porcelana para técnica metalocerâmica apresentou delaminação espontânea. As diferenças nos CETs da infraestrutura e do material de recobrimento ( $\Delta\alpha$ ) foram calculadas. Além disso as diferenças entre a  $T_g$  das porcelanas de cobertura e a temperatura ambiente ( $\Delta T$ ) foram também calculadas, como efetiva variação térmica para a formação de estresse. Os valores mais altos de resistência ao cisalhamento foram encontrados quando  $\Delta\alpha\Delta T \approx 1000 \cdot 10^{-6}$ . Assim, concluíram que o CET e a  $T_g$  da porcelana de cobertura tem um impacto na resistência ao cisalhamento dos sistemas que utilizam zircônia/porcelana de cobertura, pois apresentaram ligeira correlação com o produto da expressão  $\Delta\alpha\Delta T$ .

Dittmer et al.<sup>21</sup>, em 2009, estudaram a distribuição do estresse nas próteses parciais fixas de 4 elementos feitas no sistema zircônia/porcelana de cobertura, sob uma

carga oclusal. Um modelo de elemento finito foi construído e a análise do estresse foi realizada com uma força de 1630 N aplicada no centro da área do conector entre o primeiro molar e o segundo pré-molar. A localização do estresse de tração máximo de acordo com a análise de elemento finito coincidiu com a origem da fratura de todos os 10 espécimes fraturados em um estudo *in vitro* prévio. O estresse de tração máximo no meio da área do conector foi de 633 MPa. Com a carga aplicada de lingual para vestibular ocorreu aumento (648 MPa) e com a carga aplicada de vestibular para lingual, ocorreu diminuição (570 MPa). Estes estresses são da mesma ordem da resistência à flexão da zircônia.

Swain<sup>54</sup>, em 2009, forneceu uma análise teórica de parâmetros-chaves que podem contribuir para o desenvolvimento de estresse residual e fratura espontânea nos variados corpos-de-prova bicamadas. A análise identificou a importância da taxa de resfriamento, espessura e compatibilidade térmica no desenvolvimento de estresse residual. Estes ocorrem na porcelana de cobertura e podem promover a propagação da trinca causada por um contato danoso na restauração, levando a fratura da porcelana de cobertura. Concluiu que espessas porcelanas de cobertura nas infraestruturas com baixa difusividade térmica, como a zircônia, podem gerar altos estresses de tração na porcelana de cobertura, podendo resultar em crescimento instável de trinca ou lascamento.

Tholey et al.<sup>60</sup>, em 2009, avaliaram a interface entre porcelana de cobertura e zircônia, por meio de microscopia eletrônica de varredura, utilizando diferentes técnicas de aplicação da primeira camada de porcelana. Tiveram como hipótese que alterações microestruturais nos grãos de zircônia observados na interface estão associadas com a umidade que induz transformação de fase tetragonal para monoclinica na zircônia. Barras de zircônia Vita In-Ceram YZ (10 mm x 10 mm x 1 mm) foram divididas em 8 grupos: 1) simulação do ciclo de wash à 950 °C na zircônia (sem aplicação deste); 2) aplicação de wash, somente o pó, à 950 °C; 3) aplicação de wash, com pó e líquido próprio, à 900 °C; 4) aplicação de wash, com pó e líquido próprio, à 950 °C; 5) aplicação de wash mais viscoso (aproximadamente 5 mm de espessura), com pó e líquido próprio, à 950 °C; 6) aplicação de wash, apenas com o líquido próprio, à 950 °C; 7) aplicação de wash, com pó e água destilada, à 950 °C; 8) aplicação de wash, com pó e álcool, à 950 °C. Fatias foram cortadas e polidas. Em todos os grupos, a interface foi condicionada com ácido fluorídrico (HF) 5 % por 20 segundos, para revelar a região da

interface em detalhe. MEV foi utilizada para análise destas secções. O uso apenas do pó da porcelana sem líquido não resultou em facetamento dos grãos de zircônia, indicando que o pó sozinho não altera as características dos grãos. Em contraste, as alterações observadas usando líquido e pó mostraram um efeito visível. Água destilada, álcool e o líquido próprio do fabricante juntamente com o pó de porcelana tiveram um efeito similar nos grãos de zircônia, embora a intensidade parecesse aumentar com soluções de base aquosa. Os espécimes da amostra 5 (maior espessura) apresentaram o maior grau de facetamento, em toda a estrutura dos grãos e não só em alguns grãos como ocorreu nas camadas de wash mais finas. Outro achado que ficou claro foi que o aumento de temperatura, faz com que um facetamento mais severo ocorra. No caso, a mesma quantidade de pó e líquido foi aplicada, mostrando que o facetamento mais severo ocorreu para o grupo com maior temperatura (grupo 4). Como foi feito um grupo com 950 °C sem wash e 950 °C com apenas pó, e não afetaram a estrutura dos grãos, fica claro que papel da umidade no facetamento dos grãos.

Dittmer et al.<sup>20</sup>, em 2009, investigaram a distorção de uma prótese de 4 elementos (dois molares e dois pré-molares) induzida pelo processo de recobrimento com porcelana tanto in vitro quanto pelo método dos elementos finitos. Foram preparadas 10 próteses parciais fixas de 4 elementos com zircônia como infraestrutura. A adaptação marginal e interna foi determinada antes e depois do processo de aplicação de porcelana. O modelo em elementos finitos em três dimensões (3D) foi construído e o resfriamento após recobrimento com porcelana foi virtualmente simulado. Análises estatísticas revelaram significantes mudanças na adaptação marginal e interna devido ao processo. Análise pelo método de elementos finitos mostrou estresse de tração (acima de 65 MPa) na infraestrutura e estresse de compressão (acima de 10 MPa) na porcelana de cobertura. O estudo revelou que estresses e distorções, ocorridos devido à aplicação de porcelana podem influenciar o sucesso clínico dessas próteses. Além disso, estas distorções ocorreram praticamente em toda área em direção ao centro axial dos retentores. As principais distorções foram encontradas ao longo do eixo longitudinal das restaurações e na mesial e distal dos retentores.

Guazzato et al.<sup>27</sup>, em 2010, investigaram o desenvolvimento de fratura espontânea (lascamento, ruptura) em 5 tipos de porcelana de cobertura compatíveis para infraestrutura em zircônia, como resultado do estresse induzido pela taxa de resfriamento e espessura do espécime. Foram utilizadas 220 esferas de zircônia

parcialmente estabilizada por ítrio, de diâmetro de 7,8 mm, que foram recobertas com porcelanas de 5 diferentes marcas comerciais: Nobel Rondo, Ice, Cerabien ZR, ZI-F, VM9 com programa de queima recomendado até antes de março 2009 e VM9 com programa de queima recomendado depois de março de 2009. Corpos-de-prova (n=10) foram preparados como segue: Grupo 1,5A (1,5 gramas de porcelana aplicada e resfriada normalmente), Grupo 1,5B (1,5 gramas de porcelana aplicada e resfriamento rápido, abrindo o forno imediatamente após o fim da queima e colocando o espécime na bancada), Grupo 2,5A (2,5 gramas de porcelana aplicada e resfriada normalmente) e Grupo 2,5B (2,5 gramas de porcelana aplicada e resfriada normalmente). Os espécimes com 1,5 gramas de porcelana ficaram com diâmetro final de 11,5 mm e os com 2,5 gramas de porcelana com 14,8 mm. Após a queima, cada espécime foi examinado com ampliação de 10 vezes e sob luz ultravioleta para verificar a presença de trincas. A análise de regressão múltipla apresentou associações positivas entre a ocorrência de fratura e as 3 covariáveis (material, espessura e taxa de resfriamento). A análise estatística mostrou que a incidência de fraturas e rupturas nas porcelanas de cobertura aumentou com o resfriamento rápido e com a maior espessura dos espécimes em 3 sistemas utilizados (ICE, VM9 antes de março e ZI). O teste de Kruskal-Wallis (teste não paramétrico) confirmou os resultados obtidos por regressão múltipla ( $p < 0,0001$ ). Neste estudo as fraturas ocorreram praticamente paralelas a superfície e em alguns espécimes propagou-se através da camada de porcelana causando ruptura. A ruptura foi considerada coesiva sem exposição de zircônia.

Komine et al.<sup>34</sup>, em 2010, avaliaram o efeito das taxas de resfriamento da porcelana de cobertura após sinterização na resistência de união com a zircônia. Foram utilizados discos de dióxido de zircônio (Katana), recobertos por porcelanas indicadas para zircônia (CZR e EMX) ou por uma porcelana indicada para metal (AAA). Os espécimes foram submetidos ao resfriamento lento (remoção do forno após 4 minutos) ou rápido (remoção imediata do espécime do forno e resfriamento na temperatura ambiente) e submetidos ao teste de cisalhamento. O teste de Kruskal-Wallis e o teste de Mann Whitney foram utilizados. O modo de fratura foi analisado com microscopia e classificada em adesiva, coesiva ou mista. Análise de difração de raio X avaliou a cristalização do pó da porcelana. Segundo os autores, a duração do resfriamento da temperatura de queima até a temperatura ambiente pode afetar a resistência adesiva da porcelana de cobertura com a zircônia dependendo da porcelana utilizada. Na análise da composição, sanidina (uma forma cristalina do feldspato) e feldspato foram observados

na porcelana CZR, enquanto nenhum pico foi observado no pó de porcelana em EMX. Entretanto quando esta porcelana é sinterizada e resfriada até a temperatura ambiente, resulta em partículas de leucita embebidas na matriz vítrea. As trincas nas porcelanas feldspáticas são defletidas para longe dos cristais de leucita, reduzindo a suscetibilidade da matriz vítrea de se fraturar. A leucita não tem uma fase estável nas temperaturas de queima de porcelanas comuns. No entanto, sanidina, que tem um CET mais baixo, tem uma fase estável. Consequentemente, a resistência adesiva da porcelana CZR à zircônia Katana não foi afetada por variações nas taxas de resfriamento. Após o resfriamento lento, a análise em MEV mostrou que a interface entre porcelana EMX e zircônia Katana obteve uma condição superior em relação a condição de interface alcançada após o resfriamento rápido. Esta diferença pode ser atribuída à cristalização da porcelana de cobertura. Os achados deste estudo sugeriram que, quando aplica-se EMX sobre zircônia Katana, resfriamento lento é recomendado.

Göstemeyer et al.<sup>25</sup>, em 2010, avaliaram a influência das taxas de resfriamento até temperaturas acima da  $T_g$  na resistência adesiva entre zircônia (Lava 3M) e porcelanas de cobertura (Lava Ceram, Triceram, VM9 e Zirox). Foram feitos espécimes bicamadas em forma de barra que foram divididos em resfriamento rápido (remoção imediata do forno após sinterização para resfriar em ar ambiente) ou lento (resfriamento da temperatura de sinterização até a  $T_g$  em 5 minutos dentro do forno). Estes foram então submetidos ao ensaio de flexão em 4 pontos. A carga crítica para induzir extensão de trinca estável na interface zircônia porcelana de cobertura foi determinada, ao fim de calcular a taxa de liberação de energia de deformação(G). Foi feita também dilatométrica para determinar o CET entre 50 e 450 °C e na temperatura acima da  $T_g$ . Para todas as composições de zircônia/porcelana, valores de G foram menores para os espécimes resfriados lentamente em comparação com os que foram resfriados rapidamente. Houve correlação entre as variações nos valores de G com as diferentes taxas de resfriamento e as discrepâncias calculadas entre CET abaixo e acima da  $T_g$ . Isto indica que a diferença de CET abaixo e acima da  $T_g$  do material de cobertura afeta fortemente a distribuição de estresse térmico nas diferentes taxas de resfriamento. A resistência de união entre os infraestrutura e material de cobertura diminuiu com o resfriamento lento, indicando que esta taxa pode levar a risco de delaminação neste sistema totalmente cerâmico. Os autores associam o aumento da resistência adesiva no resfriamento rápido com um aumento da resistência a deformação flexural do espécime devido aos estresses de compressão gerados, que protegem a adesão entre infraestrutura e material de cobertura.

Rues et al.<sup>46</sup>, em 2010, investigaram o efeito de diferentes resfriamentos na incidência de falhas coesivas da porcelana de cobertura e a carga final de fratura para coroas de incisivos centrais superiores. Sessenta e oito copings de zircônia (Cercon Base1; DeguDent, Hanau, Germany), com espessura uniforme de 4 mm foram recobertas com duas porcelanas de cobertura (espessura de 2 mm na borda incisal): (1) Cercon Ceram Kiss (CCK) e (2) Cercon Ceram Love (CCL). Os espécimes foram submetidos a 3 tipos de resfriamento: convencional sem tempo de resfriamento extra (protocolo 1), resfriamento extra de 6 minutos apenas após o ciclo de glaze (protocolo 2), e resfriamento extra de 6 minutos após as queimas de dentina e de glaze (protocolo 3). Vinte coroas foram fraturadas sob carga sem envelhecimento artificial, enquanto que o restante foi submetido à termociclagem (10.000 ciclos, entre 6,5 e 60 °C, com tempo de permanência de 45 segundos) e simulação de mastigação (1.200.000 ciclos, 86 N, em água, esferas de aço com  $r = 3\text{mm}$  usadas como antagonistas) antes de ser fraturadas sob carga. A análise estatística foi realizada com testes não-paramétricos. O estudo demonstrou que uma reduzida diminuição de temperatura do começo da fase de resfriamento após o protocolo 3 e após o protocolo 2, levando a uma melhor desempenho das coroas anteriores de zircônia/porcelana de cobertura neste estudo em relação ao grupo que foi submetido ao resfriamento convencional (protocolo 1). Para um dos sistemas cerâmicos testados (CCK) esta tendência foi significativa. Para o outro sistema (CCL), apenas algumas coroas confeccionadas com resfriamento extra foram mais resistentes à fratura. Assim, os autores recomendam que se resfrie lentamente após o ciclo de queima (protocolo 2), com o intuito de aumentar a resistência à fratura e economizar tempo para o técnico de prótese dentária comparado com o protocolo 3.

Mainjot et al.<sup>39</sup>, em 2011, desenvolveram um método para mensurar os padrões de estresse residual de porcelanas de cobertura e comparar os valores obtidos em amostras bicamadas de metal/porcelana com amostras bicamada de zircônia/porcelana. Discos de zircônia (VZr) e metal (VM - liga de cobalto-cromo) foram recobertos com porcelana de cobertura Vita VM9 e Vita VM13, respectivamente, com espessura final de 3 mm (2mm para porcelana e 1 mm para material de recobrimento). O método “hole-drilling” utilizado consiste no posicionamento de strain gage na superfície do corpo de prova. Posteriormente, uma perfuração padronizada é feita adjacente. O alívio da tensão residual pela perfuração causa uma ligeira deformação do material em torno da cavidade formada. O strain gage mensura esta deformação, sendo possível calcular o tamanho do estresse residual original. No estudo foram utilizados grupos com 3 strain gages (tipo A)

e grupos com 6 strain gages (Tipo C). Todos os grupos exibiram o mesmo padrão de estresse residual versus profundidade, começando com estresse de compressão na superfície da porcelana de cobertura, que foi diminuindo progressivamente e tornando-se ligeiramente estresse de tração em torno de 0,5 a 1,0 mm de profundidade e então, tornando-se novamente de ligeira compressão em profundidades maiores. Este resultado confirmou a formação de estresse de compressão residual na superfície previamente vista na literatura. A magnitude dos estresses de compressão na superfície foram maiores para o grupo com zircônia em relação ao grupo com metal (-96 MPa versus -40 MPa), indicando maior desigualdade térmica. Além disso, uma concentração de estresses de tração no grupo com zircônia em menor área em relação ao grupo com metal foi encontrada, o que pode ser uma potencial causa de problemas encontrados na literatura neste tipo de restauração. O método utilizado mostrou ser um instrumento prático para a mensuração de estresse residual em porcelanas de cobertura.

Ishibe et al.<sup>32</sup>, em 2011, avaliaram a resistência ao cisalhamento de porcelanas prensadas e aplicadas convencionalmente sobre metal ou sobre zircônia. Cilindros de aproximadamente 5 mm de diâmetro de liga nobre (Olympia) ou zircônia (Lava) foram recobertos com porcelanas. Os cilindros de metal foram divididos em 4 grupos (n=10): porcelana prensada IPS InLine POM (Ivoclar Vivadent); porcelana aplicada convencionalmente IPS InLine (Ivoclar Vivadent); porcelana prensada Pulse press-to-metal (Ceramay), porcelana aplicada convencionalmente Authentic Pulse (Ceramay). Os cilindros de zircônia também foram divididos em 4 grupos: porcelana prensada e.max ZirPress (Ivoclar Vivadent), porcelana aplicada convencionalmente e.max Ceram (Ivoclar Vivadent), porcelana prensada VITA PM9 (VITA), porcelana aplicada convencionalmente VITA VM9 (VITA). As porcelanas de cobertura apresentavam espessura de 3 mm. Os espécimes foram submetidos ao ciclo térmico (5-55°C, 20.000 ciclos, tempo de permanência de 20 segundos). O ensaio de cisalhamento foi conduzido em máquina de ensaios universal. As superfícies fraturadas foram caracterizadas visualmente, em estereomicroscópio, e em microscopia eletrônica de varredura. Os dados foram analisados com Kruskal-Wallis e Mann-Whitney com correção de Bonferroni ( $\alpha=0,05$ ). Para espécimes metalocerâmicos, a média e desvio padrão da resistência ao cisalhamento variaram de 37,8 (20,6) MPa a 66,4 (22,1) MPa. Houve diferença significativa entre os grupos de porcelana prensada da Ivoclar e porcelana prensada da Ceramay e entre porcelana aplicada convencionalmente da Ivoclar e porcelana aplicada convencionalmente da Ceramay, nos quais as porcelanas da Ivoclar

apresentaram valores significativamente maiores que a porcelana prensada da Ceramay ( $P=0,041$ ), mostrando não haver diferença entre o modo de confecção da porcelana para o mesmo fabricante. Para o grupo com zircônia, os valores de resistência ao cisalhamento e desvio padrão variaram de 30,03 (9,49) MPa a 47,2 (13,0) MPa, com o grupo de porcelana aplicada convencionalmente da Vita apresentando resistência ao cisalhamento significativamente maior que o grupo da Ivoclar ( $P=0,012$ ), mostrando não haver diferença entre grupos de porcelana prensada ou aplicada convencionalmente. Metade do grupo de porcelana prensada da Vita (PM9) falhou durante a termociclagem, sendo excluído das análises estatísticas. Para todos os espécimes testados na resistência ao cisalhamento, falhas coesivas da porcelana de cobertura foram observadas.

Yilmaz et al. <sup>62</sup>, em 2011, compararam a resistência à flexão biaxial de dois sistemas totalmente cerâmicos (sistema Lava e sistema Cercon) com zircônia na infraestrutura e testar a hipótese de que fadiga causa uma diminuição na resistência destes sistemas. Vinte discos bicamadas (zircônia e porcelana de cobertura) de cada material foram confeccionados, alcançado uma conformação final de 15 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, sendo 1 mm de zircônia e 1 mm de porcelana. Metade dos espécimes foi submetida ao ensaio de flexão biaxial em máquina de testes universal (1mm/min) após ciclo de fadiga (20.000 ciclos, 2 Hz, 200 N) enquanto a outra metade foi para o ensaio de flexão apenas. Os estresses gerados na infraestrutura e na porcelana dos discos bicamada foram calculados utilizando as soluções de Huesh. Os dados foram analisados estatisticamente por análise de Weibull. Os espécimes fraturados foram examinados em espectroscopia Raman e a fração de fase monoclinica foi calculada na infraestrutura fraturada. Foi utilizada análise estatística ANOVA. Os módulos de Weibull ( $m$ ) do grupo Cercon Controle (CC), Cercon fadiga (CF), Lava controle (LC) e Lava fadiga (LF) foram entre 11,8 e 14,3, 7,1 e 13,1, 9,4 e 13, e 7,1 e 8,2, respectivamente. Não houve diferença estatisticamente significativa entre resistência característica ( $\sigma_0$ ) de CC (970,9 MPa) e CF (947,7 MPa) ( $p > 0,05$ ). Para o sistema Lava,  $\sigma_0$  de LF (1444,8 MPa) foi significativamente maior que LC (1240,5 MPa) ( $p < 0,05$ ). Nas interfaces, os valores de resistência característica dos grupos CC e CF não se diferenciaram estatisticamente enquanto LF apresentou  $\sigma_0$  estatisticamente maior que LC. A zircônia monoclinica foi significante menor em CF do que em CC e significante maior em LF do que em LC. Fadiga mostrou efeitos diferentes na resistência dos sistemas Cercon e Lava. Diminuições nos valores de  $m$  foram observados nas interface dos dois materiais após fadiga.

Mainjot et al.<sup>38</sup>, em 2011, estudaram a relação da taxa de resfriamento no perfil de estresse das porcelanas de cobertura aplicadas sobre metal ou zircônia. O método hole-drilling, frequentemente utilizado no campo da engenharia, foi adaptado para o uso em porcelanas dentárias. O método consiste na remoção de parte do material que sofreu estresse e medir as deformações resultantes no material adjacente. As deformações são medidas na superfície, com o auxílio de extensômetros, dos quais os estresses residuais podem ser calculados. O perfil do estresse foi mensurado em discos bicamada de 20 mm de diâmetro, com 0,7 mm de espessura de metal ou zircônia e 1,5 mm de porcelana de cobertura. Foram utilizados 3 diferentes taxas de resfriamento. Resfriamento clássico: de 900 °C à temperatura ambiente abrindo a porta do forno, e esperando alcançar 200 °C, para então remover do forno. Resfriamento modificado: manutenção do forno em 900°C por 6 minutos, resfriamento de 900°C à 600°C em forno fechado. Resfriamento lento: taxa de resfriamento de 2°C/min em forno especial. A magnitude dos estresses na superfície da porcelana de cobertura aumentou com a taxa de resfriamento, enquanto que os estresses no interior diminuíram. Na superfície, estresses de compressão foram observados em todos os espécimes. No interior, estresses de compressão foram observados para os espécimes com metal e de tração para os espécimes com zircônia. Nos espécimes com VZr, resfriados moderado e lentamente apresentaram uma gradual mudança para estresse de tração na profundidade de 0,5 mm, o que pode ser uma explicação potencial para as delaminações encontradas na prática dentária. A taxa de resfriamento influencia no estresse residual. Isto pode influenciar significativamente o comportamento mecânico dos sistemas bicamada com infraestrutura em metal ou zircônia. O material de infraestrutura influenciou a natureza do estresse no interior do espécime, com a base de zircônia apresentando um padrão de estresse menos favorável que metal.

Tholey et al.<sup>59</sup>, em 2011, estudaram os gradientes térmicos formados entre regiões mais externas e mais internas de coroas de pré-molar fabricadas com infraestrutura em zircônia parcialmente estabilizada por ítrio (Vita In-Ceram YZ) e recobrimento com porcelana VM9 durante dois diferentes tipos de resfriamento (resfriamento rápido: remoção do espécime do forno à 850 °C para resfriamento na temperatura ambiente; e resfriamento lento: manutenção do espécime no forno até a temperatura de transição vítrea, que na porcelana de cobertura VM9 encontra-se em torno de 600 °C). Foram utilizados copings de zircônia com design convencional (espessura uniforme de 0,7 mm) e anatômico (espessura de 0,7 mm na região cervical,

com aumento em direção ao terço médio, variando na cúspide em torno de 1,3 mm e para 1 mm na oclusal). Foram posicionados termopares em 10 regiões para se observar as diferenças entre as temperaturas em diferentes fases do processo de queima e de resfriamento. Observações diretas foram feitas com um polarímetro óptico e com finas fatias de copings recobertos com porcelana de cobertura. As diferenças entre os resfriamentos foram observadas em um código de cor para distribuição de estresse residual. Observou-se neste estudo que o resfriamento lento diminuiu as diferenças de temperatura, mas ainda assim, diferenças de cerca de 88 °C foram observadas. Para o resfriamento rápido, diferenças maiores que 100 °C para amostras com coping convencional e 140 °C para infraestrutura anatômica foram registradas. A superfície de porcelana mais externa atinge a temperatura de transição vítrea (600 °C no caso) mais rápido que no interior, não conseguindo relaxar os estresses desenvolvidos. Conseqüentemente, devido a esse gradiente térmico, o estresse residual fica preso na porcelana de cobertura. As observações com polarímetro óptico indicaram estresses na porcelana de cobertura muito menores nos espécimes submetidos ao resfriamento lento. Assim, o resfriamento lento da última queima (geralmente a queima de glaze) reduziria os gradientes térmicos e estresse residual na porcelana, que significam uma possível causa de lascamento.

Choi et al.<sup>13</sup>, em 2011, determinaram a tenacidade à fratura e os estresses residuais presentes em porcelanas de cobertura prensáveis para zircônia (Noritake CZR Press, Vita PM9, Wieland PressXzr e IPS e.max ZirPress), induzidos por gradientes térmicos durante o resfriamento. Os dois grupos de corpos-de-prova bicamada consistiam de 2 mm de zircônia, sendo a espessura da porcelana de cobertura a diferença entre ambos (2 e 4 mm de porcelana prensável). Já os monocamadas foram divididos em um grupo com 2 mm de porcelana prensável apenas e um grupo com 2 mm de cada porcelana antes de ser prensada. Os bicamadas foram divididos em 3 tipos de resfriamento: rápido (remoção do espécime do forno tão logo este desça, seguido de jatos de ar); normal (remoção do espécime do forno quando este chega na temperatura inicial, patamar); e lento (parava-se a descida de resfriamento do forno e aguardava a temperatura alcançar cerca de 100 °C, dependendo cerca de 30 a 40 minutos em média). Os monocamadas de 2 mm de porcelana prensável foram submetidos ao resfriamento lento descrito acima. Os 4 grupos (monocamadas e bicamadas) foram submetidos a um teste de endentação para tenacidade à fratura, para avaliação do estresse residual presente nas várias porcelanas prensáveis utilizadas (Noritake CZR

Press, Vita PM9, Wieland PressXzr e IPS e.max ZirPress). Também foram posicionados termopares nos bicamadas de Noritake CZR Press e IPS e.max ZirPress para ilustrar as diferenças térmicas entre a interface e a superfície durante o resfriamento. Foram observados maiores valores de tenacidade à fratura dos monocamadas para Noritake CZR tanto antes quanto depois de a porcelana ser prensada. Também foi observado maiores valores para as porcelanas que contém leucita (Noritake CZR Press e Vita PM9) em relação as que não a contém (Wieland PressXzr e IPS e.max ZirPress). Os resultados do ensaio de tenacidade à fratura confirmaram a presença de estresse residual de compressão na superfície para os corpos-de-prova submetidos a diferentes taxas de resfriamento. Foi observado que o resfriamento lento reduziu a formação de estresse residual em todas as porcelanas prensáveis enquanto que o resfriamento rápido aumentou. Os termopares mostraram que o resfriamento lento gerou muito menos gradientes térmicos entre superfície e interface. Concluíram que porcelanas contendo leucita apresentam maior tenacidade à fratura intrínseca, e todas as porcelanas geraram significativo estresse residual quando submetidas ao resfriamento rápido. Para diminuição do desenvolvimento de estresse residual, resfriamento lento é recomendado para a última queima da porcelana de cobertura (queima de glaze).

Choi et al.<sup>14</sup>, em 2011, compararam a fase cristalina de 4 marcas comerciais de porcelanas prensadas (Noritake CZR Press, Vita PM9, Wieland PressXzr e IPS e.max ZirPress) para zircônia (Vita In-Ceram YZ), além de mensurar suas propriedades mecânicas e quantificar a adesão com zircônia. Foi feita difração de raio-X nas porcelanas. A adesão foi determinada utilizando taxas de liberação de energia de deformação na interface. Resistência à flexão biaxial de cada material foi determinado, tanto em espécime monocamada, como em espécime bicamada (zircônia e porcelana de cobertura). A análise de difração de raio-X revelou que Noritake CZR e Vita PM9 contém leucita enquanto IPS e.max ZirPress e Wieland PressXzr não contém (material mais amorfo). Os sistemas bicamada com porcelana contendo leucita tiveram maior resistência à flexão que as que não contém e os bicamadas tiveram maiores valores que os monocamadas. A taxa de liberação de energia de deformação o maior para porcelanas prensadas com leucita revelou melhor adesão à zircônia do que as porcelanas que não contém este cristal. As falhas foram principalmente coesivas para as porcelanas prensadas sobre zircônia, o que sugere que a delaminação devido à falha adesiva entre zircônia e porcelana de cobertura não é ao fator principal responsável pelos lascamentos.

Zhang et al.<sup>65</sup>, em 2012, exploraram quanto sensível as respostas térmicas e mecânicas, como mudanças na temperatura e estresse residual térmico de sistemas cerâmicos bicamada, seriam em respeito ao design e variações de fabricação (espessura de camadas e coeficiente de transferência de calor) durante o resfriamento da porcelana de cobertura. Foram utilizados sistema com alumina convencional na base recobertos com porcelana de cobertura VM7 e sistema com infraestrutura em zircônia Y-TZP recoberta com porcelana VM9. Foram desenvolvidos 3 modelos bicamadas com diferentes geometrias: espécime bicamada simples (15 mm de comprimento, 4 mm de espessura total, sendo 0,6 mm de infraestrutura e 3,4 mm de porcelana); espécime bicamada triangular (comprimento de base de 15 mm, altura total de 4 mm, espessura da infraestrutura de 0,6 mm e 3,4 mm de espessura no ponto mais espesso de porcelana); e uma coroa bicamada assimétrica (coroa seccionada em 2D com espessura de infraestrutura de 0,7 mm e de porcelana 1,1 mm). A espessura da camada e o coeficiente de calor convectivo (ou taxa de resfriamento) parecem ser mais sensíveis para porcelanas aplicadas em zircônia. Foi ressaltada a importância do coeficiente de transferência de calor e proporção de espessura entre infraestrutura e camada de cobertura nas distribuições térmicas e estresses residuais.

Mainjot et al.<sup>41</sup>, em 2012, investigaram a relação entre a espessura de porcelana de cobertura e o padrão de estresse residual em sistema metalocerâmico e totalmente cerâmico. Discos (20 mm de diâmetro e 1 mm de espessura) de zircônia VZr (n=10) e metal VM (n=10) foram recobertos com porcelana de cobertura VM9 e VM13, respectivamente, em espessuras de 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm e 3mm. Foi utilizado o método hole-drilling para determinação dos estresses residuais. Todos os grupos apresentaram o mesmo tipo de padrão de estresse versus profundidade, iniciando com compressão na superfície da porcelana, diminuindo na profundidade de 0,5-1,0mm da superfície, e então tornando-se compressivo novamente nas proximidades da infraestrutura, exceto para a amostra com base em zircônia contendo 1,5 mm de porcelana, que exibiu estresse de tração no interior. Estresses na superfície do metal não foram influenciados pela espessura da porcelana. Variação do estresse no interior a 1,2 mm da superfície em função da espessura de porcelana foi invertida para infraestruturas de metal e zircônia. Todas as amostras com VZr contendo 3 mm de espessura de porcelana desenvolveram fratura espontânea após o acabamento ou após o último ciclo de queima, o que pode ser explicado pela flexão da infraestrutura devido a contração de uma grande quantidade de porcelana, que gera estresse de tração perpendicularmente na

infraestrutura. Além do mais, muito estresse de compressão no interior pode ser esperado. A abordagem cronológica em 3 passos pode explicar o desenvolvimento de estresse residual na porcelana de cobertura. O primeiro passo consiste no efeito de têmpera, que explica o desenvolvimento de estresse de compressão na superfície de todas as amostras. O segundo passo é o efeito dos diferentes coeficientes de expansão térmico (CET) dos materiais envolvidos, que explica o desenvolvimento de estresse de compressão no interior da porcelana próximo a infraestrutura em todos os grupos. O terceiro passo, que só ocorre para o grupo com zircônia na infraestrutura, consiste no efeito da transformação cristalina por estresse na zircônia, que é uma hipótese para explicar a variação invertida no estresse medido no interior da espessura da porcelana nos grupos com zircônia e com metal na base. Esta cristalização gera um aumento de volume local na superfície da infraestrutura, que se contrapõe ao efeito da diferença de CET. Neste estudo, amostras com porcelana de cobertura em espessuras mais finas exibiram padrão de estresse favorável, confirmando as recomendações clínicas.

Zhang et al.<sup>63</sup>, em 2012, estudaram a validação da mensuração do estresse residual da zircônia e da porcelana de cobertura em coroas totalmente cerâmicas pelo sistema por nanoindentação. Copings de 0,5 mm de zircônia (LAVA 3M/ESPE) foram recobertos com Lava Ceram. As coroas foram cortadas ao meio com disco diamantado e polidas. Partes de zircônia e porcelana, foram aquecidas a 400°C (cerca de 100 °C abaixo da  $T_g$ ) por 5 horas, para que a tensão residual fosse relaxada sem que a microestrutura fosse alterada, sendo este o grupo de referência. Tanto as amostras deste grupo, quanto as amostras estressadas, foram polidas da mesma maneira, para minimizar os efeitos do polimento. O teste de nanoindentação (deslocamento de 0,2 nm e carga de 50 nN) foi executado na secção da peça tanto na porcelana quanto na zircônia em 4 pontos críticos, divididos de acordo com a espessura da porcelana no local: mais espessa na região de cúspide (2,2 mm), médias nas proximais (1,4 e 1,2 mm) e mais fina no sulco oclusal (0,5 mm). O estresse residual foi determinado por comparação das medidas de dureza das amostras estressadas com as de referência. O estresse residual atua como uma força extra adicionada a força de uma indentação. Um material com estresse residual de tração apresentará maior profundidade de indentação, resultando em uma menor dureza, o que seria oposto caso o material tivesse estresse residual de compressão. As medidas foram comparadas com os resultados da difração de raio-X e elemento finito. Os resultados mostraram que existe grande quantidade de estresse residual nas coroas dentais e a magnitude delas difere entre os locais, devido a forma

complexa da coroa. A média de estresse residual para as porcelanas foi de 260 MPa para região de espessura de 1,4 mm, 323 MPa para a região mais espessa (cúspide), 231 MPa para a região mais fina e 104 MPa para a região média proximal de 1,2 mm. Não apenas a espessura afetou o estresse residual, mas a geometria da coroa teve efeito significativo. Estresse residual foi mais de tração para a região de cúspide, o que indica que curvatura tem efeito. Além do mais, esta área apresentou os maiores valores de estresse, o que ajuda a explicar porque o lascamento ocorre frequentemente nesta região. Regiões diferentes com espessuras similares também apresentaram diferentes valores de estresse residual (espessuras médias de porcelana). A média de estresse residual foram altas na margem de  $-637$  MPa e 323 MPa para zircônia e porcelana de cobertura, respectivamente.

Schmitter et al.<sup>50</sup>, em 2012, avaliaram a carga necessária para falha de coroas com infraestrutura em zircônia e recobrimento feito com porcelanas através da tecnologia CAD/CAM. Trinta e dois copings de zircônia (Sirona inCoris ZI) de 0,6 mm de espessura foram feitos, sendo que em 16 deles foram recobertos com cerâmica de dissilicato de lítio (IPS e.max CAD) por CAD/CAM (fixados à zircônia via (IPS e.max CAD Crystall/Connect) e 16 foram aplicadas porcelanas de cobertura convencional manualmente (controle). Metade dos espécimes (n=8) foram submetidos à ensaio mecânico pela aplicação de carga ocorria na cúspide méso-lingual em um ângulo de 30° em relação a direção de inserção, com a finalidade de se obter a resistência inicial dos espécimes. A outra metade foi submetida a termociclagem (10.000 termociclos; 6,5°C/60°C, com tempo de permanência de 45 segundos) e simulação de mastigação (1,2 milhões de ciclos, em uma magnitude de força de 108 N). Após isso foi testada a resistência conforme citado acima. Para avaliar o efeito dos diferentes sistemas utilizados em relação a carga necessária para fratura, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e teste U de Mann-Whitney, com  $\alpha < 0,05$  com nível de significância). O estudo demonstrou que coroas feitas com cerâmicas de dissilicato de lítio por CAD/CAM sobre zircônia obtiveram uma maior resistência à fratura (cerca de 1600N) em comparação aos espécimes com porcelana de cobertura convencional aplicada manualmente. Além disso, coroas de dissilicato de lítio por CAD/CAM pareceram não ser afetadas por envelhecimento, enquanto 87,5 % das coroas com porcelana aplicada manualmente falharam durante o teste de mastigação, com falha coesiva da porcelana de cobertura. Resultados como este indicam que a tecnologia CAD/CAM empregada tanto para zircônia como para o material de cobertura pode ser

uma maneira de reduzir as falhas do sistema totalmente cerâmico originadas por fadiga do material.

Tan et al.<sup>55</sup>, em 2012 avaliaram a influência de protocolos de queima e resfriamento na resistência da porcelana de cobertura para zircônia. Para isso, os espécimes foram submetidos a 3 protocolos de queima (25 °C/min, 50 °C/min e 75 °C/min) e a 3 taxas de resfriamento, que consistiam em rápido (remoção do espécime do forno logo após este ter descido completamente), moderado (manutenção do espécime por 7,5 minutos com o forno aberto até chegar a 500 °C) e lento (manutenção do espécime no forno 30% aberto por 15 minutos até alcançar a temperatura ambiente). O método de flexão em 4 pontos modificado foi utilizado para medir a resistência. Neste teste, a porcelana é aderida na zircônia apenas entre os dois pistões de carga centrais. A combinação resfriamento lento e menor taxa de queima resultou em altas taxas de carga para fratura (alta resistência), sendo aproximadamente duas vezes maior que a combinação resfriamento rápido/menor taxa de queima (75 °C/min). ANOVA revelou que os efeitos dos regimes de resfriamento e queima tiveram altos e significantes efeitos na carga para fratura. Teste de Tukey foi utilizado para identificar diferenças entre os protocolos de queima e de resfriamento. O efeito do regime de resfriamento foi maior que o de queima da porcelana de cobertura. Desse modo, os autores recomendam que se utilizem taxas de queima mais lentas e resfriamento lento quando forem utilizadas porcelanas de cobertura para zircônia. Através de fractografia, foi observada que a falha ocorria na porcelana de cobertura adjacente a interface, enquanto que uma fina camada de porcelana de cobertura permanecia na zircônia. Este achado indica que o estresse residual leva à falha coesiva da porcelana de cobertura próxima a zircônia. Por outro lado, a sobrevivência da interface indica que a preparação da superfície da zircônia é adequada.

Belli et al.<sup>9</sup>, em 2012, testaram a hipótese de que a incompatibilidade térmica entre zircônia e porcelana de cobertura, bem como a taxa de resfriamento utilizada, estariam diretamente proporcionais à magnitude do estresse residual gerado na porcelana. Foi determinado o coeficiente de foloelasticidade de duas porcelanas de cobertura para recobrimento de infraestruturas de zircônia e medida a distribuição espacial e a magnitude do estresse residual nas porcelanas sobre a zircônia resfriadas por 2 protocolos de resfriamento. Porcelanas com diferentes coeficientes de expansão térmica foram utilizadas para gerar uma alta e baixa incompatibilidade térmica com a zircônia. As porcelanas de cobertura Vita VM9 (CET=9,1 ppm/°C) e Lava Ceram

(CET=10,2 ppm/°C) foram aplicadas sobre copings de 0.7 mm de espessura de zircônia Vita YZ Cubes (10,5 ppm/°C) confeccionados para um segundo pré-molar, gerando maior e menor incompatibilidade térmica com o material de infraestrutura, respectivamente. Os espécimes foram resfriados de modo rápido (remoção imediata do forno, expondo a coroas a temperatura ambiente) ou modo lento (abertura do forno em 10% até que a temperatura dentro do forno alcançasse 200 °C, para então abri-lo completamente). As coroas foram fatiadas em seções de 1 mm de espessura. O retardo de ondas de luz polarizadas foi usado para calcular a magnitude do estresse residual e a sua distribuição ao redor da porcelana, de acordo com o princípio da fotoelasticidade. Para o cálculo do coeficiente de fotoelasticidade, 3 discos de cada porcelana foram confeccionados, encontrando os seguintes valores: 9,25 1/TPa para Lava Ceram e 10,4 1/TPa para VM9. As coroas de Lava Ceram apresentaram valores de estresse residual máximo de  $1,8 \pm 0,1$  MPa para resfriamento rápido e  $1,4 \pm 0,1$  MPa para resfriamento lento, enquanto que as coroas recobertas com VM9 apresentaram  $6,9 \pm 0,2$  MPa para resfriamento rápido e  $5,8 \pm 0,2$  MPa para resfriamento lento. Enquanto incompatibilidade térmica foi um fator influente no máximo estresse desenvolvido na porcelana, as taxas de resfriamento tiveram um papel mínimo. Superfícies curvas foram locais preferidos para a concentração de estresse independente da incompatibilidade térmica ou da taxa de resfriamento.

Mainjot et al.<sup>42</sup>, em 2012, investigaram a influência da espessura da infraestrutura de zircônia no perfil de estresse residual mensurado nas amostras de zircônia/porcelana de cobertura. O perfil de estresse foi medido com o método hole-drilling em espécimes bicamada (n=12) de 20 mm de diâmetro com 1,5 mm de espessura de porcelana de cobertura Vita VM9. Seis diferentes espessuras (n=2) de zircônia Vita In-Ceram YZ (0,5 mm, 0,7 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm e 3 mm) foram avaliadas. Após a aplicação da porcelana de cobertura (3 queimas), todos os espécimes foram submetidos individualmente a um último ciclo de queima, que restaurou o padrão de estresse na espessura da porcelana de cobertura. Cada espécime do grupo era submetido a um tipo de resfriamento: clássico (que consistia na abertura do forno a 900 °C aguardando o resfriamento até a temperatura ambiente e removendo o espécime da manta a 200 °C) ou lento (que consistia na manutenção do espécime no forno a 900 °C por 6 minutos ao invés de 1 minuto e então resfriado a uma taxa de 2 °C/min até a temperatura ambiente em um forno especial). Estresses de compressão foram observados na superfície, e estresse de tração na profundidade da maioria das amostras.

O resfriamento lento promoveu o desenvolvimento de estresse de tração interior, exceto para a amostra com 3 mm de espessura de zircônia. Na presente configuração, o resfriamento lento agravou o efeito negativo da espessura da infraestrutura. Embora minimize os efeitos dos gradientes térmicos, os estresses residuais gerados pelo resfriamento lento mostraram com uma tendência de ser mais de tração do que os que foram resfriados de maneira clássica. De fato, a incompatibilidade de CET é quase efetiva quando as 2 camadas resfriam na mesma taxa: no resfriamento lento mais estresse são induzidos na interface e então, maior o risco de transformação, e mais estresse de tração na porcelana de cobertura. Com o processo de têmpera, amostras com 1,5 mm de espessura de zircônia exibiram o perfil de estresse mais favorável, enquanto que os grupos com maior e menor espessura de infraestrutura exibiram, respectivamente, estresse de tração na superfície e no interior. Do ponto de vista clínico, 1,5 mm de espessura de infraestrutura não pode ser utilizado para uma coroa convencional anterior, devido as propriedades ópticas da zircônia e a necessidade de espaço para a aplicação de porcelana. Porém, poderia ser indicado para restaurações posteriores ou próteses parafusadas sobre implante.

Göstemeyer et al.<sup>26</sup>, em 2012, estudaram o impacto do estresse residual térmico na resistência adesiva entre zircônia (Lava 3M) e 7 porcelanas de cobertura de diferentes coeficientes de expansão térmica (CET), sendo quatro delas específicas para zircônia (Lava Ceram, VM9, Triceram, Zirox), duas para alumina (Allux e VM7) e uma para metal (VM13). Para medida do CET e da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) foram realizados ensaios de dilatométrica. Os CETs ( $\text{ppm K}^{-1}$ ) e  $T_g$ s ( $^{\circ}\text{C}$ ) obtidos foram respectivamente: Zircônia Lava 3M -  $10,6 \text{ ppm K}^{-1}$ ; VM7 -  $7,2 \text{ ppm K}^{-1}$  e  $607,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Allux -  $7,4 \text{ ppm K}^{-1}$  e  $570,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Triceram -  $8,6 \text{ ppm K}^{-1}$  e  $556,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; VM9 -  $9,2 \text{ ppm K}^{-1}$  e  $599,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Zirox -  $9,5 \text{ ppm K}^{-1}$  e  $570,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Lava Ceram -  $9,7 \text{ ppm K}^{-1}$  e  $543,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e VM13-  $13,4 \text{ ppm K}^{-1}$  e  $561,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . A diferença entre os CETs da porcelana e da zircônia assim como a diferença entre a  $T_g$  e a temperatura ambiente foram utilizadas para estimativa do estresse residual térmico. Foram confeccionados 10 corpos-de-prova bicamada de cada combinação zircônia/porcelana de cobertura, com dimensões finais de 25 mm de comprimento, 8 mm de largura e 2,5 mm de espessura (1,25 de zircônia e 1,25 de porcelana). Os espécimes foram pré-entalhados em forma de V no centro transversal ao comprimento da porcelana de cobertura. Foi então realizado o ensaio de flexão em 4 pontos (carga no lado da zircônia; velocidade de  $0,01 \text{ mm/min}$ ). Durante o crescimento estável de trinca ao longo da interface, a curva de carga/deslocamento

apresentava uma região de platô. A taxa de liberação de energia (G) foi calculada utilizando a média de carga observada no platô. Em complemento foram feitas análises em MEV (microscopia eletrônica de varredura). ANOVA ( $p < 0,05$ ) foi utilizada para verificar se os vários materiais eram significativamente diferentes em relação ao CET,  $T_g$ , estresse residual e taxa de liberação de energia. Os estresses de tensão residual variaram de  $-48,3 \pm 1,5$  MPa (VM7) à  $36,1 \pm 4,8$  MPa (VM13), com diferença significativa entre todos os grupos. As taxas de liberação de energia variaram de  $8,2 \pm 1,7$  J/m<sup>2</sup> (Lava Ceram) à  $17,1 \pm 2,8$  J/m<sup>2</sup> (VM9). Os valores de G não puderam ser obtidos para os espécimes com VM7, Allux e VM13, devido fratura espontânea ou crescimento instável de trinca. Exceto para os grupos com Triceram e Zirox, a taxa de liberação de energia foi significativamente diferente entre todos os grupos. Foi encontrada correlação entre o estresse residual gerado e a taxa de liberação de energia. O grupo zircônia/VM9 apresentou o maior valor de G com estresse residual de 19,3 MPa, mostrando que ligeiros estresses de compressão em torno de 20 MPa foram benéficos para a adesão entre zircônia e porcelana. Estresses maiores ou menores levaram a uma adesão diminuída. As análises de MEV revelaram que a trinca se iniciou no pré-entalhe, estendeu direto para a zircônia, bifurcou-se próximo desta e se estendeu ao longo da interface. Uma fina camada de porcelana de cobertura permaneceu na superfície.

Teng et al.<sup>58</sup>, em 2012, estudaram o efeito de um método simples e novo de tratamento de superfície da zircônia na resistência adesiva entre zircônia e porcelana de cobertura, avaliados através de ensaio de cisalhamento (método Schmitz-Schulmeyer). Trinta espécimes de zircônia em forma de barra ( $10 \times 5 \times 5$  mm) foram recobertos com porcelana ( $5 \times 3 \times 3$  mm). Foram avaliados três diferentes métodos de tratamento de superfície: polimento com lixas de carbetto de silício de granulação 1200 em água; jateamento com partículas de alumina de 110  $\mu$ m; e modificação com pó de zircônia, que consistia na mistura de partículas de zircônia menores que 3  $\mu$ m misturadas com adesivo para formar uma massa, que foi aplicada duas vezes com pincel na superfície da zircônia pré-sinterizada, seguida da sinterização dos espécimes do grupo. Um sistema metalocerâmico foi utilizado como grupo controle. Todos os espécimes foram submetidos ao ensaio de cisalhamento em uma máquina de ensaios universal com velocidade de 0,5 mm/min. Os valores de resistência ao cisalhamento foram analisados com ANOVA e Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Os espécimes fraturados foram examinados com microscopia eletrônica de varredura para observar o modo de fratura. Os valores médios de resistência ao cisalhamento MPa foram 47.02 (6.4)MPa para zircônia modificada,

36.66 (8.6)MPa para zircônia polida, 39.14 (6.5)MPa para zircônia jateada, e 46.12 (7.1)MPa para o grupo controle. As médias de resistência ao cisalhamento do grupo controle ( $P=.028$ ) e do grupo de zircônia modificada ( $P=.014$ ) foi estatisticamente maior que a média do grupo de zircônia polida. O grupo de zircônia jateada não foi estatisticamente diferente de nenhum grupo. Análise de MEV mostrou que a fratura coesiva na porcelana de cobertura predominou no grupo com zircônia modificada, enquanto que nos outros grupos a fratura ocorreu principalmente na interface. Além do mais, o grupo com zircônia modificada caracterizou-se por uma superfície rugosa e com microporosidades abundantes, o que permitiria a penetração de porcelana de cobertura e produção de uma camada híbrida na superfície da zircônia. A modificação com pó de zircônia pode aumentar significativamente a resistência ao cisalhamento da zircônia com a porcelana de cobertura, resultados que são comparados com metalocerâmica. Este aumento de resistência foi demonstrado pelo principal modo de falha encontrado nos grupos, mostrando que a resistência adesiva foi maior que a resistência da porcelana de cobertura no grupo com zircônia modificada. O pré-tratamento de superfície pode aumentar a capacidade adesiva da zircônia na porcelana de cobertura e reduzir as fraturas na interface das restaurações.

Lin et al.<sup>36</sup>, em 2012, compararam o efeito da porcelana de cobertura (espécimes monocamadas ou bicamadas) e a técnica de fabricação da infraestrutura (prensadas por calor ou CAD/CAM) na resistência à flexão biaxial e módulo de Weibull de cerâmicas reforçadas por leucita e dissilicato de lítio. Além disso, o efeito da técnica de aplicação da porcelana de cobertura (convencional ou prensada) para os espécimes com zircônia na resistência à flexão biaxial e módulo de Weibull foi também estudado. Cinco materiais cerâmicos para infraestrutura (IPS Empress Esthetic, IPS Empress CAD, IPS e.max Press, IPS e.max CAD, IPS e.max ZirCAD) e três porcelanas de cobertura (IPS Empress Esthetic Veneer, IPS e.max Ceram, IPS e.max ZirPress) foram selecionadas para o estudo. Cada material para infraestrutura foi subdividido em 3 subgrupos: grupo com 1,5 mm de infraestrutura (espécimes monocamada;1,5C), grupo com 0,8 mm de infraestrutura (espécime monocamada;0,8C) e grupo com 0,8 mm de infraestrutura e 0,7 mm de porcelana de cobertura (espécime bicamada;1,5) aplicada convencionalmente(pó/líquido). O grupo com ZirCAD conteve um grupo adicional bicamada com porcelana prensada aplicada sobre a zircônia. A resistência à flexão biaxial foi comparada para cada subgrupo ( $n=10$ ) com ANOVA e pós teste de Tukey. Módulo de Weibull foi utilizada para análise da confiabilidade estrutural. Para todos os

materiais de infraestrutura, o grupo bicamada obteve média de resistência à flexão biaxial significativamente menor que os outros dois subgrupos (com 0,8 mm e 1,5 mm de espessura de infraestrutura apenas). Para o grupo ZirCAD, o grupo com porcelana aplicada convencionalmente apresentou resistência à flexão biaxial significativamente menor que o subgrupo com porcelana prensada ( $p = 0.004$ ), porém o grupo com porcelana aplicada convencionalmente apresentou maior módulo de Weibull. Independente da técnica de aplicação de porcelana de cobertura sobre a zircônia, o grupo bicamada de ZirCAD exibiu maior resistência à flexão que grupo com cerâmica reforçada com leucita e grupo com dissilicato de lítio. Os métodos CAD/CAM e método de prensagem não tiveram efeito significativo na resistência à flexão biaxial e no módulo de Weibull dos materiais de infraestrutura testados, sendo a única exceção a de cerâmica de dissilicato de lítio fabricada por técnica de prensagem, que apresentou maior confiabilidade com maior módulo de Weibull. Os autores concluíram que no presente estudo, a aplicação de porcelana de cobertura sobre o material de infraestrutura diminui a resistência à flexão e a confiabilidade de espécimes bicamadas.

Baldassari et al.<sup>8</sup>, em 2012, estudaram o tipo e a magnitude do estresse residual em seis próteses parciais fixas de 3 elementos inferior (segundo pré-molar e segundo molar como pilares e primeiro molar como pântico) do sistema NobelBiocare. As porcelanas foram aplicadas convencionalmente utilizando taxas de resfriamento lento (30 °C/min). Todas as próteses foram embutidas em resina epóxi. Cada prótese foi seccionada paralela ao plano oclusal com disco diamantado produzindo seções planas para indentação Vickers ( $n = 143$ ; carga = 9.8 N; tempo de permanência = 5 s). O método de indentação Vickers, na qual os estresses residuais na superfície podem ser estimados por comparação do comprimento da trinca da indentação de amostras estressadas (bicamadas) com não estressadas (monocamadas), tem como vantagem a possibilidade de mensuração do estresse residual tanto transversal quanto na direção radial, orientado por dois eixos ortogonais da pirâmide de indentação paralela e perpendicular à interface porcelana/zircônia, respectivamente. Quatro espécimes foram incluídos com zircônia e porcelana (bicamada), enquanto que os dois restantes tiveram a infraestrutura de zircônia removida com cuidado, incluindo somente a porcelana (monocamada). A média de comprimento das trincas e desvio padrão, nas direções transversal e radial (isto é, paralela ou perpendicular à interface porcelana/zircônia, respectivamente) foram  $67 \pm 12 \mu\text{m}$  e  $52 \pm 8 \mu\text{m}$  para bicamadas e  $64 \pm 8 \mu\text{m}$  e  $64 \pm 7 \mu\text{m}$  para monocamadas. Os resultados indicaram um grande arco de estresse de

compressão (~40–50 MPa) e um moderado estresse de tração radial (~10 MPa) no corpo da porcelana de cobertura. Esta presença de estresse de tração radial na porcelana de cobertura pode levar a lascamentos e fraturas clínicas das próteses deste sistema zircônia/porcelana de cobertura. Os autores também concluíram que este método de indentação Vickers é um método poderoso para determinação do estresse residual nas porcelanas de cobertura dentais.

Choi et al.<sup>15</sup>, em 2012, compararam os valores de resistência à fratura de algumas porcelanas de cobertura, confeccionadas por diferentes técnicas. Foram confeccionados por CAD/CAM 45 copings de zircônia LAVA (0,5 mm de espessura) para um primeiro molar inferior, divididos em 3 grupos: aplicação de porcelana de cobertura pela técnica convencional (Vita VM9), porcelana prensada por calor (IPS e.max ZirPress) e um terceiro grupo com a porcelana de cobertura desenvolvida por CAD/CAM para posteriormente ser aderida sobre o coping por meio de uma cerâmica de baixa fusão experimental. As coroas foram cimentadas no modelo de titânio com cimento Rely XTM Unicem (3M ESPE) e testadas em máquina universal de ensaios até fratura. As cargas foram aplicadas com uma semi-esfera de aço de 6 mm de diâmetro na superfície oclusal das coroas com uma velocidade de 0.5 mm/min. A média de valores de resistência à fratura foram comparadas por ANOVA de uma variância e pós teste de múltipla comparação ( $\alpha= 0,05$ ). Microscopia eletrônica de varredura investigou a interface fraturada. A média de resistência à fratura e desvio padrão foram  $4263,8 \pm 1110,8$  N para porcelana aplicada convencionalmente,  $5070,8 \pm 1016,4$  para porcelana prensada e  $6242,0 \pm 1759,5$  N para porcelana produzida por CAD/CAM, sendo esta última significativamente maior que os dois primeiros grupos, que não diferiram entre si.

Almeida-Júnior et al.<sup>5</sup>, em 2012, compararam a resistência à flexão em 3 pontos, parâmetros de Weibull, dureza Vickers e tenacidade à fratura de porcelanas para metal e para zircônia. Foram confeccionadas barras (n=30) de e.maxCeram (EM) e VitaVM9 (V9), indicadas para uso sobre zircônia, e barras de Duceragold (DG) e VitaVMK95 (VK), utilizadas sobre ligas metálicas. Teste de Kruskal-Wallis e de Dun foram utilizados para as análises estatísticas. Não houve diferença significativa entre as 4 porcelanas utilizadas em relação a resistência à flexão. Os parâmetros de Weibull apresentaram maior confiabilidade para VK (10,8), acompanhada por EM (7,1), V9 (5,7) e DG (5,6). Em relação à dureza Vickers, EM (536,3 VHN), V9 (579,9 VHN,) e VK (522,1 VHN,) não apresentaram diferença estatística, enquanto que DG (489,6)

apresentou um valor estatisticamente menor. O maior valor de tenacidade à fratura foi para VK (1,77 (MPa/mm<sup>1/2</sup>)), enquanto que DG (1,58 (MPa/mm<sup>1/2</sup>)) apresentou um valor intermediário e V9 (1,33 (MPa/mm<sup>1/2</sup>)) e EM (1,18 (MPa/mm<sup>1/2</sup>)) tiveram os menores valores. Concluiu-se que apesar dos valores adequados de resistência à flexão e dureza, as porcelanas usadas sobre zircônia apresentaram menores valores de tenacidade à fratura, sugerindo que esta propriedade mecânica pode estar relacionada à maior ocorrência de fratura no sistema totalmente cerâmico contendo zircônia com infraestrutura.

Silva et al.<sup>53</sup>, em 2012, testaram a hipótese de que a confiabilidade de coroas totalmente cerâmicas é melhorada modificando-se o design da infraestrutura. Análise pelo método de elementos finitos foi utilizada para verificar a distribuição máxima de estresse nos sistemas. Foram desenvolvidas coroas para um primeiro molar inferior previamente preparado, com diminuição de 1,5 mm de suas paredes proximais e 2,0 mm de sua superfície oclusal. A tecnologia CAD/CAM foi utilizada para a confecção dos copings de zircônia, que eram convencionais (0,5 mm de espessura em todo coping) ou modificadas (2,5 mm de altura, 1 mm de espessura na lingual estendendo para as proximais). Foi aplicado 1,5 mm de porcelana de cobertura. As metalocerâmicas foram fabricadas seguindo o design convencional. Todas as coroas foram cimentadas com cimento resinoso e envelhecidas por 14 dias em água destilada e submetidas à ensaio de resistência até fratura ou testadas por fadiga. As cargas foram posicionadas na cúspide mesio-lingual ou disto-bucal (n=21 para cada sistema e cúspide). A estatística de Weibull e curvas de nível de probabilidade foram calculadas. Comparado com o grupo totalmente cerâmico convencional e com metalocerâmicas, maiores níveis de estresse foram observados na região da infraestrutura para o grupo com coping modificado. Embora maiores níveis de estresse terem sido observados para o design modificado com carga na cúspide mesio-lingual, este grupo apresentou maior confiabilidade durante o ensaio mecânico laboratorial comparado tanto com os grupos totalmente cerâmicos convencionais que receberam carga tanto na cúspide mesio-lingual quanto na disto-bucal. A fratura dos grupos totalmente cerâmicos ocorreu em forma de lascamento da porcelana de cobertura sem exposição da infraestrutura para o grupo de design convencional e com exposição da interface zircônia/porcelana para o grupo com design modificado. Nas metalocerâmicas, as falhas foram lascamentos combinados com exposição de metal. Estas características da fratura estão de acordo com o que ocorre clinicamente. A análise pelo método de elementos finitos mostrou que, comparado com

metalocerâmicas, grupos totalmente cerâmicos apresentaram maiores níveis de estresse na porcelana de cobertura e na zircônia em ambos os designs (convencional e modificado).

Millen et al.<sup>43</sup>, em 2012, avaliaram a influência da espessura da infraestrutura e da porcelana de cobertura na resistência à fratura de coroas para sistemas metalocerâmicos e totalmente cerâmicos contendo zircônia. Foram confeccionados 30 copings de zircônia (Lava 3M ESPE) e 30 copings metálicos (Endurance 52), subdivididos em 3 grupos (n=10), de acordo com suas espessuras: 0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm de espessura. Cada grupo de 10 foi dividido em outros 2 grupos com espessura final de 3 e 4 mm, contando com a porcelana de cobertura (Lava Ceram e Vita VMK 95, para zircônia e metal, respectivamente). Os espécimes foram cimentados em um pilar de titânio com cimento de óxido de zinco e testados em microindentação. Foram mensurados o comprimento da trinca, dureza e lascamentos através de microscopia, das quais a tenacidade à fratura foi calculada. O teste de Kruskal–Wallis e regressão linear simples foram utilizadas para analisar os resultados, revelando em médias de comprimento de trinca significativamente maiores em espécimes de zircônia em relação aos de metal. Copings de 0,5 mm de espessura e espécimes com coping metálico apresentaram os maiores valores de tenacidade à fratura. Copings mais finos com maior espessura de porcelana de cobertura aumentaram a tenacidade à fratura. Assim, espécimes com copings de 0,5 mm apresentaram os maiores valores de tenacidade à fratura, explicado pela maior espessura de porcelana de cobertura no coping que contribui na diminuição do estresse residual no sistema. A regressão linear simples mostrou um efeito limitado na espessura total ou na espessura de porcelana de cobertura no comprimento de trinca e na dureza. No entanto, a espessura do coping apresentou correlação positiva com ambos. Lascamentos ocorreram com maior frequência nos espécimes com coping de zircônia. Os estresses residuais foram maiores nos grupos com zircônia e apresentaram uma correlação positiva com comprimento de trinca. A proporção da porcelana de cobertura foi correlacionada negativamente com o estresse residual.

Bonfante et al.<sup>12</sup>, em 2012, simularam os campos de estresse gerados em coroas de molares devido ao coeficiente de expansão térmica (CET) em corpos-de-prova monocamadas de metal e de sistemas cerâmicos, bem como devido a incompatibilidade térmica de CET entre infraestruturas de metal, alumina e zircônia com a porcelana de cobertura quando resfriadas após queima em altas temperaturas. Foi desenvolvido um

primeiro molar inferior em 3D no computador. O preparo do dente consistia em redução de 1,5 mm das paredes axiais e de 2 mm em superfícies oclusais. As coroas monolíticas (porcelana total, alumina, metal ou zircônia) ou subdivididas em infraestrutura (metal, zircônia ou alumina) e porcelana de cobertura. O modelo foi termicamente carregado de 900 °C até 25 °C. Através de análise de elemento finito, regiões e valores de estresse principal máximo na infraestrutura e nas porcelanas de cobertura foram determinadas em gráficos 3D. O sistema metal/porcelana e zircônia/porcelana apresentaram campos de compressão no corpo da cúspide em porcelana, já que apresentam maior CET em relação a porcelana (diferença positiva), enquanto o sistema alumina/porcelana apresentou campos de tração. Na interface infraestrutura/material de recobrimento, estresses de compressão foram observados para sistemas metal/porcelana, ligeira tração para zircônia/porcelana e estresse de tração de maior magnitude para alumina/porcelana. Estes estresses de tração encontrados na interface zircônia/porcelana podem ser responsáveis pelas maiores taxas de falha em restaurações deste sistema em relação as metalocerâmicas. Crescentes estresses de compressão foram observados para sistemas monolíticos de metal, alumina, zircônia, e porcelana total. Variações nos níveis de estresse térmico residual foram observados entre sistemas monocamada e bicamada devido à interação entre configuração da coroa e propriedades dos materiais.

Kim et al.<sup>33</sup>, em 2013, compararam as cargas de fratura e modo de falha de coroas de dissilicato de lítio confeccionadas com tecnologia CAD/CAM (IPS e.max CAD LT), coroas de zircônia recoberta com porcelana prensada (IPS e.max ZirPress LT) e coroas de zircônia recoberta com porcelana aplicada convencionalmente (IPS e.max Ceram), totalizando 24 coroas de primeiro molar inferior para prótese sobre implante (n=8). Os copings de zircônia foram confeccionados utilizando uma fresadora Cerec. Todas as coroas foram cimentados com cimento resinoso nos pilares, que estavam conectados aos implantes fixos. A carga de fratura foi mensurada em máquina universal de ensaios, e a superfície fraturadas foi avaliada com microscopia eletrônica de varredura. O grupo zircônia/porcelana prensada apresentou carga para fratura de (5229.3 N), sendo significativamente maior quando comparado com grupo de dissilicato de lítio e grupo zircônia/porcelana convencional, que apresentaram 3852.1 N e 3100.3 N, respectivamente. No grupo com porcelanas aplicadas convencionalmente, todas as fraturas ocorreram no corpo da porcelana, o que foi associado a sua fraca resistência, falhas técnicas e fragilidade estrutural causada por bolhas. No entanto, no grupo com porcelana prensada, o modo de fratura foi geralmente uma fratura completa da

infraestrutura e da porcelana, o que pode ser explicado pela sua maior resistência e união mais forte com zircônia.

Belli et al.<sup>10</sup>, em 2013, investigaram os efeitos dos estresses residuais térmicos na confiabilidade e no tempo de vida de coroas com infraestrutura em zircônia recoberta com porcelana. Copings de zircônia (YZ Cubes, Vita Zahnfabrik) de 0,7 mm de espessura foram fabricados (N=128). Destes, metade foi submetida à jateamento (partículas de alumina de 105µm, a 0,4 MPa de pressão, com distância de 3 cm e ângulo de 45° por 15 s) com o intuito de criar mais rugosidade na superfície e desencadear a transformação martensítica da zircônia, tornando a superfície desta rica em fase monoclinica. Os copings foram recobertos com porcelana de cobertura VM9 (CET=9,1 ppm/°C) ou com Lava Ceram (CET=10,2 ppm/°C), simulando grande e pequena diferença de CET com a zircônia (CET=10,5 ppm/°C), respectivamente. Após a queima da porcelana de cobertura, metade dos espécimes de cada grupo foi submetido a um resfriamento rápido, que consistia em uma abertura imediata do forno no término de sua queima, expondo as coroas em contato com o ar ambiente (taxa de resfriamento de 600 °C/min). A outra metade foi submetida a um resfriamento lento, que consistia na abertura do forno em 10% para que resfriasse até 200°C (taxa de resfriamento de 30°C/min). As coroas de segundos pré-molares superiores foram submetidas ao ensaio estático de resistência a compressão (n=16). A outra metade das coroas foram submetidas ao ensaio de fadiga em simulador de mastigação (200 N até falha). Neste ensaio, após o contato com a coroa, o antagonista se movia 0,7 mm em direção ao sulco oclusal a 20 mm/s, simulando o caminho na qual o dente desliza durante função. A probabilidade de falha para resistência inicial e fadiga foi realizada usando parâmetros de Weibull. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para análise da superfície. O ensaio de resistência à compressão mostrou uma baixa sensibilidade para detectar variações de confiabilidade entre estresses residuais térmicos criados na porcelana de cobertura das coroas. Para o ensaio de fadiga, o resfriamento lento resultou em número de ciclos estatisticamente maiores apenas para coroas recobertas com VM9. Assim, este tipo de resfriamento foi recomendado pelos autores em casos onde se tem maior diferença de CET com a zircônia. Usar uma porcelana de cobertura com CET mais próximo ao da zircônia aumenta a longevidade deste tipo de prótese e reduz a influência da taxa de resfriamento utilizada, segundo os autores. O relaxamento estrutural dos materiais vítreos, como a porcelana de cobertura, é um processo

controlado pela fluidez plástica acima e em torno da  $T_g$ , que é dependente da viscosidade de cisalhamento do vidro. As observações morfológicas das superfícies de VM9 e Lava Ceram revelaram fase cristalina em ambas porcelanas, com uma maior quantidade e tamanho de cristais para VM9. Isto pode sugerir que Lava Ceram alcança um estado mais relaxado antes da solidificação comparado com VM9, o que pode explicar porque Lava Ceram foi menos afetada pelos estresses decorrentes do resfriamento rápido.

Mainjot et al.<sup>40</sup>, em 2013, estudaram a interface zircônia/porcelana de cobertura utilizando nanotomografia por feixe de íons focalizados (FIB-nt), e desta maneira, confrontaram as observações com as medidas de estresse residual na porcelana de cobertura. Dois espécimes foram desenvolvidos. Um deles (VZr07) apresentava 0,7 mm de zircônia (Vita YZ), 1,5 mm de porcelana de cobertura (VM9) e foi submetido ao resfriamento com taxa de 2 °C/min de 900 °C até a temperatura ambiente (resfriamento lento). O outro espécime (VZr10) apresentava 1,0 mm de zircônia, 2 mm de porcelana de cobertura e foi resfriado do modo clássico, ou seja, aguardando que o forno à 900 °C alcançasse 200 °C para remoção deste (resfriamento clássico). Os estresses residuais foram então mensurados utilizando-se método hole-drilling e observados em microscopia eletrônica de varredura (imagem em 2D) e em nanotomografia por feixe de íons focalizados (imagem em 3D). Foram associadas análises químicas por espectroscopia por energia de dispersão de raio-X (EDS). O estresse de superfície da porcelana de cobertura foi de compressão em ambos os espécimes. Estresses de compressão foram diminuindo com a profundidade e se tornaram novamente mais compressivos de 0,5 a 0,7 mm da superfície para VZr10, e tornaram-se estresse de tração para VZr07, mostrando padrões opostos de estresse residual em relação à profundidade. O efeito de têmpera, o efeito da incompatibilidade térmica de CET e a possível transformação cristalina da zircônia por estresse induzido foram sugeridos para explicar os achados. Este estudo permitiu, pela primeira vez, uma caracterização em 3D de grande acurácia da interface zircônia/porcelana de cobertura, destacando precisamente alterações estruturais e microtrincas na sub-superfície na camada de 1µm de espessura da zircônia em contato com a porcelana de cobertura submetida à estresse de tração. As observações não revelaram qualquer alteração acima da profundidade de 2 µm, ou na zircônia em contato com porcelana de cobertura submetida à estresse de compressão. Estes resultados sugerem que a zircônia pode sofrer alterações em suas

propriedades na superfície, levando ao desenvolvimento de estresse de tração na porcelana de cobertura e aumentando o risco de lascamento.

Rinke et al.<sup>45</sup>, em 2013, compararam as taxas de sobrevivência, sucesso e lascamento de coroas metalocerâmicas convencionais e coroas com zircônia na infraestrutura (sistema totalmente cerâmico) posicionadas em molares, contendo uma infraestrutura com design anatômico pronunciado e seguindo um protocolo prolongado de resfriamento da porcelana de cobertura (6 minutos no último ciclo) pós sinterização. Cinquenta e três pacientes foram tratados com metalocerâmica (liga nobre + porcelana de baixa fusão) ou coroas contendo zircônia como infraestrutura (Sistema Cercon, DeguDent, Germany). Destes, quarenta e nove pacientes (30 mulheres e 19 homens) com 100 restaurações (48 metalocerâmicas e 52 totalmente cerâmicas com zircônia/período de observação de  $36,5 \pm 6$  meses) participaram no acompanhamento controle e foram incluídos no estudo. Sobrevivência (definida como uma reconstrução que permaneceu sem nenhuma falha absoluta durante o acompanhamento, ou seja, falha que não levou a troca da restauração ou extração do dente), Sucesso (definida como uma reconstrução que permaneceu sem modificação ou intervenção para manutenção de função durante o acompanhamento) e taxas de lascamento (defeitos na porcelana de cobertura) foram calculadas de acordo com o método Kaplan-Meier e analisado em relação a técnica de fabricação de coroa, usando modelo Cox de regressão ( $P < 0,05$ ). Três fraturas completas, sendo 1 em metalocerâmica e 2 em zircônia foram observadas, levando a taxas de sobrevivência de 97,6% e 95,2%, respectivamente. 90,9% das metalocerâmicas permaneceram livres de eventos (2 porcelanas fraturaram e um dente foi tratado endodonticamente), enquanto que a taxa de sucesso das restaurações com zircônia foi na faixa de 86,8% (duas fraturas de porcelana, um tratamento endodôntico e uma cárie secundária). Não foram encontradas diferenças significativas nas taxas de sobrevivência, sucesso e lascamento. A combinação de design anatômico pronunciado da infraestrutura e modificação do protocolo de resfriamento da porcelana de cobertura para a fabricação de coroas com zircônia levou a taxas de sobrevivência, sucesso e lascamento comparáveis as taxas encontradas em metalocerâmicos, em um período de 3 anos, concluindo que não há risco aumentado de uma fratura da infraestrutura ou de tratamento endodôntico em restaurações zircônia/porcelana de cobertura.

Ansong et al.<sup>7</sup>, em 2013, avaliaram a tenacidade à fratura de porcelanas aplicadas convencionalmente ou prensadas tanto para zircônia como para ligas nobres. Foram confeccionadas barras de 8 porcelanas diferentes seguindo a norma ISO 6872,

variando a marca comercial, o modo de confecção e a indicação. No caso, porcelanas Ivoclar-Vivadent (I) e Noritake (N), tanto para prensagem (P) como para aplicação convencional (L), para ligas de metal nobre (M) ou zircônia (Z). O método do entalhe foi utilizado no centro de cada espécime, posteriormente ensaiados em máquina universal ( $n=6$ ; 0,5 mm/min) e os valores de carga para fratura obtidos foram utilizados para o cálculo da tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ). As superfícies fraturadas foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura, e os elementos foram determinados por espectroscopia de energia de dispersão de raio-X. Os dados foram analisados por ANOVA de 3 variâncias. As médias de tenacidade à fratura obtidas variaram de  $1,20 \pm 0,04 \text{ MPa.m}^{1/2}$  (grupo NZL) a  $1,74 \pm 0,04 \text{ MPa.m}^{1/2}$  (grupo IZL). Tenacidade à fratura foi significativamente maior no grupo IZL ( $1,74 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ) que no grupo IZP ( $1,41 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ), mas menor no grupo NZL ( $1,20 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ) que no grupo NZP ( $1,36 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ) ( $p < 0,01$ ). A tenacidade à fratura foi um pouco menor no grupo IML ( $1,36 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ) que no grupo IMP ( $1,47 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ), e não foi significativamente diferente da encontrada entre o grupo NML e NMP. Porcelanas de cobertura para metal apresentaram estrutura cristalográfica mista com fase vítrea na superfície fraturada. Os resultados da análise espectroscópica da energia de dispersão de raio-X da superfície fraturada indicou que as porcelanas testadas eram compostas de Si, Al, K, Na, Mg, e elementos de oxigênio. Concluíram que porcelanas usadas para substrato zircônia podem ter vários valores de tenacidade à fratura, associados principalmente ao processo de fabricação.

Almeida-Júnior et al.<sup>6</sup>, em 2013, investigaram o efeito de métodos de resfriamento extremos na resistência à flexão, confiabilidade estrutural e resistência ao cisalhamento das porcelanas de cobertura para zircônia. Porcelana de cobertura Vita VM9 foi aplicada sobre barras de zircônia (22 mm de comprimento x 4 mm de largura x 0,7 de espessura), até que chegassem na conformação final de 22 mm x 4 mm x 1,2 mm. Os espécimes foram resfriados por um dos 3 métodos: dentro do forno desligado (lento), dentro do forno até 500 °C (normal) ou através de remoção imediata do forno seguida de jatos de ar (rápido). O ensaio de flexão em 3 pontos foi executado com a porcelana de cobertura em tração (PT,  $n=30$ ) ou com a zircônia em tração (ZT,  $n=30$ ). O ensaio de cisalhamento ( $n=15$ ) foi realizado em blocos de zircônia de 9 mm de comprimento e 2 mm de espessura, sobre os quais foram aplicados cilindros VM9 de 5 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. As falhas no ensaio de cisalhamento foram classificadas em adesiva, coesiva ou mista. Os dados foram submetido a análise

ANOVA de uma variância e pós teste de Tukey ( $p < 0.05$ ). Análises de Weibull foram realizadas para configurações PT e ZT. ANOVA para configuração PT foi significativa e teste de Tukey revelou que o resfriamento rápido leva a valores de resistência à flexão significativamente maiores ( $p < 0.01$ ) que os outros métodos de resfriamento. Este resultado pode estar relacionada à têmpera da porcelana devido a altas taxas de resfriamento e a uma ampla diferença nos gradientes térmicos, que podem induzir solidifica o não uniforme da superfície para o centro, levando a estresse de compressão na superfície, aumentando a resistência. ANOVA para configura o ZT não foi significativa ( $p = 0.06$ ). Análises de Weibull mostraram que o resfriamento normal teve uma confiabilidade estrutural ligeiramente melhor para ambas as configura es (PT e ZT). Testes estatísticos mostraram que o resfriamento lento diminui a resistência ao cisalhamento ( $p < 0.01$ ) e mostrou menos fratura adesiva que os outros métodos. Estes resultados podem ser atribuídos ao estresse de compressão gerado na porcelana de cobertura sob resfriamento rápido, que pode melhorar a resistência da superfície e desenvolver altos estresses de traço na interface zircônia/porcelana, levando a uma maior predominância de falha adesiva. Assim sendo, concluem que o resfriamento lento parece afetar a resistência da porcelana de cobertura e sua adesão com zircônia; no entanto, a confiabilidade estrutural dos espécimes com resfriamento rápido foi ligeiramente menor do que os resfriados de modo normal e lento.

Belli et al.<sup>11</sup>, em 2013, realizaram análise fractográfica de coroas de zircônia/porcelana de cobertura submetidas a fratura est tica e a fadiga dinâmica. Copings de zircônia (YZ Cubes, Vita Zahnfabrik) de 0,7 mm de espessura foram fabricados (N=128). Destes, metade foi submetida à jateamento (partículas de alumina de 105 m, a 0,4 MPa de pressão, com distância de 3 cm e ângulo de 45  por 15 s) com o intuito de criar mais rugosidade na superfície e desencadear a transforma o martensítica da zircônia, tornando a superfície desta rica em fase monoclínica. Os copings foram recobertos com porcelana VM9 (CET=9,1ppm/ C) ou com Lava Ceram (CET=10,2ppm/ C), simulando grande e pequena diferença de CET com a zircônia (CET=10,5ppm/ C), respectivamente. Após a queima da porcelana de cobertura, metade dos espécimes de cada grupo foi submetido a um resfriamento rápido, que consistia em uma abertura imediata do forno no término de sua queima, expondo as coroas em contato com o ar ambiente (taxa de resfriamento de 600  C/min). A outra metade foi submetida a um resfriamento lento, que consistia na abertura do forno em 10% para que resfriasse até 200  C (taxa de resfriamento de 30  C/min). As coroas de segundos pré-

molares superiores foram submetidas a ensaio estático de resistência a compressão (n=16). A outra metade das coroas foram submetidas a ensaio de fadiga em simulador de mastigação (200 N até falha). Neste ensaio, após o contato com a coroa, o antagonista se movia 0,7 mm em direção ao sulco oclusal a 20 mm/s, simulando o caminho na qual o dente desliza durante função. A análise de fractografia pode estabelecer o padrão de fratura de próteses com base em zircônia tendo baixa ou alta diferença de CET, o que pode ser usado como referência para análises fractográficas futuras em restaurações deste sistema para determinar a causa da falha. Coroas apresentando alto estresse de tração interno devido à incompatibilidade térmica entre zircônia e porcelana de cobertura apresentarão mais superfícies de fratura mais profundas e mais complexas, enquanto que baixa incompatibilidade de CET resultará em menores e mais planos lascamentos da porcelana. Nenhuma diferença clara foi observada para coroas submetidas ao resfriamento rápido ou lento. A rugosidade aumentada nem a presença teórica de fase monoclinica na interface influenciaram a adesão entre infraestrutura e material de recobrimento.

Alhasanyah et al.<sup>4</sup>, em 2013, estudaram o efeito de diferentes variações na espessura do coping de zircônia (Nobel Biocare) na resistência à fratura pós-fadiga em coroas revestidas com porcelana (Jensen Creation ZI). As infraestruturas em zircônia foram fabricadas com 0,6 mm de espessura (grupo A), 1,7 mm na oclusal e 1,2 no restante (grupo B), e 1,2 de espessura (grupo C). Um grupo controle metalocerâmico (liga de paládio-prata recoberta com porcelana de cobertura Jensen Creation CC) com 1,2 mm de espessura de coping foi adicionado (grupo D). Os grupos A, B, C e D foram recobertos com espessuras de porcelana de 1,8 mm, 0,7 mm, 1,2 mm e 1,2 mm, respectivamente. Os 20 espécimes de cada grupo foram submetidos à fadiga (carga média de 110 N, frequência de 10 Hz e 100.000 ciclos) e posteriormente ao ensaio de resistência à compressão (velocidade de 1mm/min). Através de exame microscópico, as fraturas foram classificadas em coesiva menor (fratura na porcelana que poderia ser reparada clinicamente com acabamento e polimento), coesiva maior (fratura na porcelana que requereria troca da restauração) e adesiva (quando a fratura atingia a interface e se propagava através desta). Foi utilizado ANOVA de uma variância ( $P < 0,05$ ) e pós teste de Tukey para se determinar diferenças significantes entre as médias. Os grupos apresentaram como valores médios de resistência à compressão pós-fadiga  $1653,94 \pm 391,45$  (grupo A),  $1841,59 \pm 372,60$  (grupo B),  $1586,74 \pm 418,71$  (grupo C) e  $2118,99 \pm 144,46$  (grupo D). Desta forma, o grupo B não apresentou média

significativamente diferente do grupo controle (grupo D), enquanto que as médias dos Grupos A e C foram menores e com diferença estatística significativa em relação ao controle. Assim, pode-se concluir que copings de zircônia com espessura extra-oclusal de 1,7 mm melhoraram a resistência à fratura da porcelana de cobertura. Além do mais, as médias de resistência a fratura foram bem superiores a força máxima de mordida (880 N) gerada. Os resultados indicaram diferentes tipos de falhas. Nos grupos D e B foram encontradas uma maior quantidade de falhas adesivas (80% e 45%, respectivamente) e com cargas maiores. No grupo B, 45% foram falhas coesivas menores (que podem ser corrigidas clinicamente), enquanto que nos grupos A e C foram encontradas 5% e 25% deste tipo de falha, respectivamente. Em contraste, falhas adesivas de 80% para o grupo A e 20% para o grupo C foram encontradas, porém, com cargas relativamente menores. Portanto, espessuras reduzidas de porcelana em coroas com zircônia como infraestrutura podem aumentar o papel do coping no suporte e na resistência à fratura, influenciando os níveis de carga na fratura adesiva, e o modo de fratura coesiva na porcelana, levando a diferentes modos de fratura.

Schmitter et al.<sup>51</sup>, em 2013, avaliaram a carga de fratura de coroas com infraestrutura em zircônia ((Sirona inCoris ZI)) recobertas com porcelana aplicada convencionalmente (n=16) ou porcelanas fabricadas por tecnologia CAD/CAM (CEREC Bloc, Sirona;n=16), que foram posteriormente cimentadas no coping de zircônia com Panavia 2.0 (Kuraray). Metade dos espécimes de cada grupo foram submetidos a carga até fratura enquanto a outra metade foi submetida a termociclagem (10.000 termociclos; 6,5 °C/60 °C, com tempo de permanência de 45 segundos) e simulação de mastigação (1,2 milhões de ciclos, em uma magnitude de força de 108 N) antes da avaliação da carga final de fratura. Para avaliar o efeito dos diferentes sistemas utilizados em relação a carga necessária para fratura, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e teste U de Mann-Whitney, com  $\alpha < 0,05$  com nível de significância). Análise de elemento finito foi conduzida com base na geometria original. A carga de fratura inicial foi significativamente maior no grupo com porcelana aplicada convencionalmente (1166±189 N) em relação ao grupo com grupo CAD/CAM (395 ± 96N), o que pode ser explicado pelas propriedades mecânicas da interface do material. A análise de elemento finito revelou estresse de tração de mesma magnitude da resistência do material CEREC Bloc (150 MPa) alcançado em sua superfície interna pelo cimento resinoso macio quando a coroa sofreu carga de 600 N. Durante simulação de mastigação, no entanto, 87,5% das coroas do grupo com porcelana de cobertura

aplicada convencionalmente falharam, enquanto nenhuma coroa no grupo CAD/CAM falhou, mostrando que este último foi significativamente menos sensível ao envelhecimento.



### **3 PROPOSIÇÃO**

Este estudo tem por objetivo caracterizar mecanicamente duas porcelanas feldspáticas indicadas para cobertura de infraestrutura de zircônia, sendo uma de aplicação convencional e a outra prensável, em termos de:

- resistência à flexão biaxial
- dureza Vickers
- tenacidade à fratura

Além disso, visa comparar a resistência à flexão biaxial de corpos-de-prova bicamada compostos por zircônia recoberta por ambos os tipos de porcelanas sob dois diferentes tipos de resfriamento (lento ou rápido), bem como análise de fratura.

## **MATERIAL E MÉTODO**

---

## 4 MATERIAL E MÉTODO

### 4.1 Material

Neste estudo foram utilizados óxido de zircônio estabilizado por ítrio VITA In-Ceram YZ (VitaZahnfabrik, BadSäckingen, Alemanha), porcelana feldspática convencional VITA VM9 (VitaZahnfabrik, BadSäckingen, Alemanha) e porcelana prensável VITA PM9 (VitaZahnfabrik, BadSäckingen, Alemanha) (Figura 1) (Tabela 1).

Figura 1 - a) Zircônia Vita In-Ceram YZ; b) Embalagem de porcelana de cobertura VITA VM9 e líquido de modelar VITA; c) Pastilhas de VITA PM9.

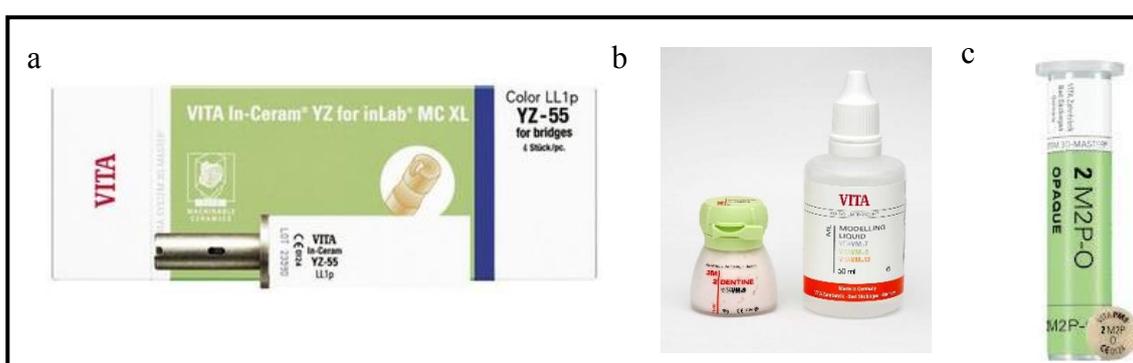


Tabela 1 - Características dos materiais.

Material	Temperatura de sinterização(°C)	Temperatura de transição vítrea (°C)	Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> )
VITA In-Ceram YZ	1530 <sup>a</sup>	-	10,5 <sup>a</sup>
VITA VM9	910 <sup>a</sup>	599,7 <sup>b</sup>	9,0 - 9,2 <sup>a</sup>
VITA PM9	1000 <sup>a</sup>	640 <sup>c</sup>	9,0 – 9,5 <sup>a</sup>

a: de acordo com fabricante; b: de acordo com Göstemeyer et al.<sup>26</sup>; c: de acordo com Choi et al.<sup>13</sup>

### 4.2 Caracterização das porcelanas de cobertura

Foram confeccionados espécimes monocamada de Vita VM9 e de Vita PM9 com 12 mm de diâmetro e espessura de 1,2 mm, de acordo com a Norma ISO 6872 para materiais cerâmicos<sup>30</sup>. A caracterização das porcelanas foi feita por ensaios de resistência à flexão biaxial, dureza Vickers e tenacidade à fratura.

### 4.2.1 Confeção dos corpos-de-prova monocamada de VM9

Os 15 corpos-de-prova foram confeccionados com auxílio de uma matriz de elastômero (Impregum F, 3M ESPE, Seefeld, Alemanha) com dimensões 20% maiores que o tamanho final dos espécimes, para que a contração de sinterização fosse compensada. A porcelana foi preparada pela mistura por saturação de massa padronizada do pó da porcelana Vita VM9 e do líquido de modelar Vita VM Modelling Liquid (VitaZahnfabrik, BadSäckingen, Alemanha). Pequenas porções desta massa foram aplicadas e condensadas com uma espátula metálica para cerâmica até completar o molde (Figura 2a).

Após a remoção do excesso do líquido com papel absorvente, a porcelana foi removida do molde e levada a uma manta de revestimento rígida (EDG, São Carlos, São Paulo, Brasil) (Figura 2b) para a sinterização no forno Alumini Press (EDG, São Carlos, São Paulo, Brasil) (Figura 2c) de acordo com o ciclo de aquecimento proposto pelo fabricante da porcelana de cobertura (Tabela 2).

Tabela 2 - Ciclo de sinterização da porcelana feldspática VITA VM9 proposto pelo fabricante.

Programa	Inicial	Aquecimento/Sinterização	Resfriamento
Temperatura	500 °C	910 °C	Temp. Ambiente
Velocidade	-	55 °C/min	*
Patamar	6 min	1 min	-
Atmosfera	Ar	Vácuo	Ar

Figura 2 - a) Matriz de elastômero com porcelana VM9 aplicada; b) Espécime de porcelana VM9 na manta de revestimento rígida antes da sinterização; 2.c) Sinterização da porcelana VM9 em forno Alumini Press.



Os corpos-de-prova foram resfriados conforme as recomendações do fabricante (forno com abertura de 75% ou mais), regularizados e polidos em meio aquoso em polidora mecânica Metaserv (Buehler, Londres, Inglaterra) com lixas sequenciais de

carbeto de sílcio de granulação 120, 280, 320, 400, 600, 1200 e 2000. Um dispositivo metálico foi utilizado para padronizar o acabamento de acordo com as dimensões preconizadas (Figura 3).

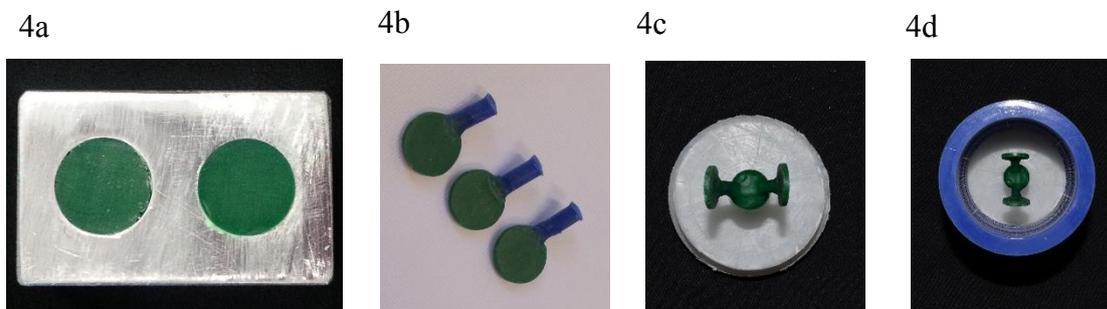
Figura 3 - a) Polidora mecânica Metaserv; b) Dispositivo metálico para polimento; c) Corpos-de-prova posicionados no dispositivo.



#### 4.2.2 Confeção dos corpos-de-prova monocamada de PM9

Para a obtenção dos 15 corpos-de-prova foi confeccionada uma matriz metálica com cavidade de 12 mm de diâmetro e 1,2 mm de profundidade, para obtenção de padrões de cera (Figura 4a). Conduitos de alimentação (sprues) confeccionados com fios de cera foram ligados aos discos encerados (Figura 4b). A massa da cera junto com os sprues injetáveis foi determinada para estimar a quantidade necessária de pastilhas injetáveis de VITA PM9. Foi utilizada uma pastilha de VITA PM9 para confeccionar 2 discos. O conjunto disco encerado e padrão de cera foi conectado à base formadora de cadinho próprios do sistema (Figura 4c). Os sprues foram posicionados em ângulo de 45°, respeitando a distância mínima de 10 mm em relação à parede do anel de fundição (Figura 4d).

Figura 4 - a) Matriz metálica para enceramento do espécime de PM9 monocamada; b) Sprues conectados aos corpos-de-prova encerados; c) Conjunto (Sprue + Corpo-de-prova encerado) conectados à base formadora de cadinho; d) Anel de fundição posicionado.



Para a inclusão foi utilizado o revestimento Bellavest® SH (BEGO) (180 gramas de pó para 45 ml de líquido BegoSol HE) (Figura 5), proporcionado de acordo com as instruções do fabricante e manipulado primeiramente de forma manual (Figura 6) seguida pela espatulação à vácuo por 60 segundos (Figura 7). O revestimento foi então vertido no anel de silicone próprio do sistema até uma marca indicada (Figura 8). Um nivelador também foi colocado no anel de revestimento, para que fosse determinada a altura do molde do material de revestimento e a posição correta no forno de injeção (Figura 9). Após a presa do revestimento e remoção da base formadora de cadinho e anel de silicone, qualquer defeito na base foi removido com uma faca para gesso para assegurar o correto assentamento no forno de injeção.

Figura 5 - Conjunto revestimento Bellavest® SH (BEGO) e Líquido BegoSol HE.



Figura 6 - Mistura manual do revestimento.

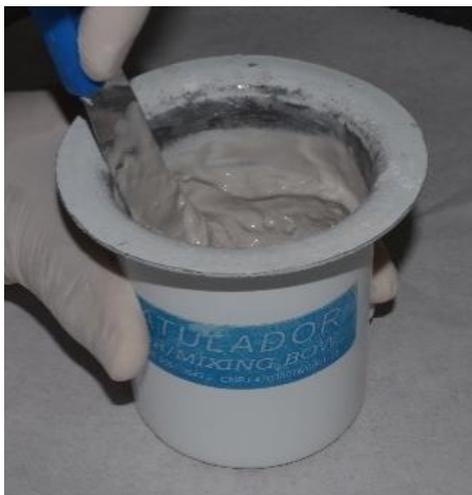


Figura 7 - Espatulação do revestimento à vácuo.



Figura 8 - Revestimento sendo vertido no anel de fundição.



Figura 9 - Anel de fundição com tampa.



O bloco de revestimento foi colocado no forno para pré-aquecimento (EDG 3P-S 3000) (Figuras 10a e 10b), onde ocorre a eliminação da cera, seguindo o ciclo descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Ciclo de queima do revestimento Bellavest® SH (BEGO) proposto pelo fabricante.

Programa	Inicial	Temperatura 1	Temperatura final
Temperatura	Temp. ambiente	250°C	850 °C
Velocidade	-	5 °C/min	7°C/min
Patamar	-	30 min	60 min
Atmosfera	Ar	Ar	Ar

Após o pré-aquecimento, as pastilhas injetáveis frias de Vita PM9 foram colocadas na abertura criada pela base formadora de cadinho, juntamente com os êmbolos injetáveis descartáveis do fabricante (VITA PM) (Figura 11a). O conjunto foi então rapidamente transferido do forno de pré-aquecimento para o forno de injeção Alumini Press (EDG, São Carlos, São Paulo, Brasil) para evitar perda de calor (Figura 11b). Após o programa de injeção (Tabela 4), os corpos-de-prova foram removidos do forno quando atingiram 500 °C e resfriados até temperatura ambiente em bancada (Figura 12).

Figura 10 - a) Forno para pré-aquecimento (EDG 3P-S 3000); b) Forno aberto à temperatura de 850 °C para remoção do bloco de revestimento.

10a



10b



Figura 11 - a) Pastilha PM9 posicionada na abertura criada pela base formadora de cadinho; b) Pastilhas juntamente com os êmbolos injetáveis descartáveis (VITA PM) transferidos do forno de pré-aquecimento para o forno de injeção Alumini Press (EDG, São Carlos, São Paulo, Brasil).

11a



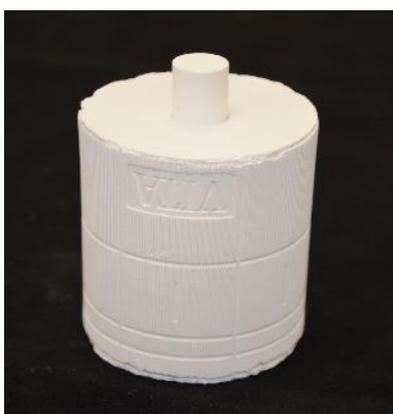
11b



Tabela 4 - Ciclo de sinterização recomendado para Vita PM9.

Programa	Inicial	Aquecimento/Sinterização	Resfriamento
Temperatura	700°C	1000°C	Temp. Ambiente
Velocidade	-	50°C/min	*
Patamar	-	20 min	-
Atmosfera	Ar	Vácuo/Pressão 4,7 bars	Ar

Figura 12 - Pastilha PM9 injetada no bloco de revestimento.



O revestimento foi cortado com disco de corte acima do material injetado e a estrutura injetada removida cuidadosamente com instrumentos manuais (Figura 13).

Figura 13 - Processo de desinclusão.



Um jateamento foi feito com grânulos vítreos de 50  $\mu\text{m}$  cada grão em uma pressão de 4 bars aplicada sobre o revestimento remanescente até que o espécime pudesse ser visto. Neste ponto a pressão foi reduzida para 2 bars.

A separação do espécime dos sprues foi feita por disco diamantado e o acabamento com pontas diamantadas de granulação fina, com leve pressão em baixa rotação.

O acabamento e polimento foram feitos conforme descrição anterior em 2.2.1 (Figura 14).

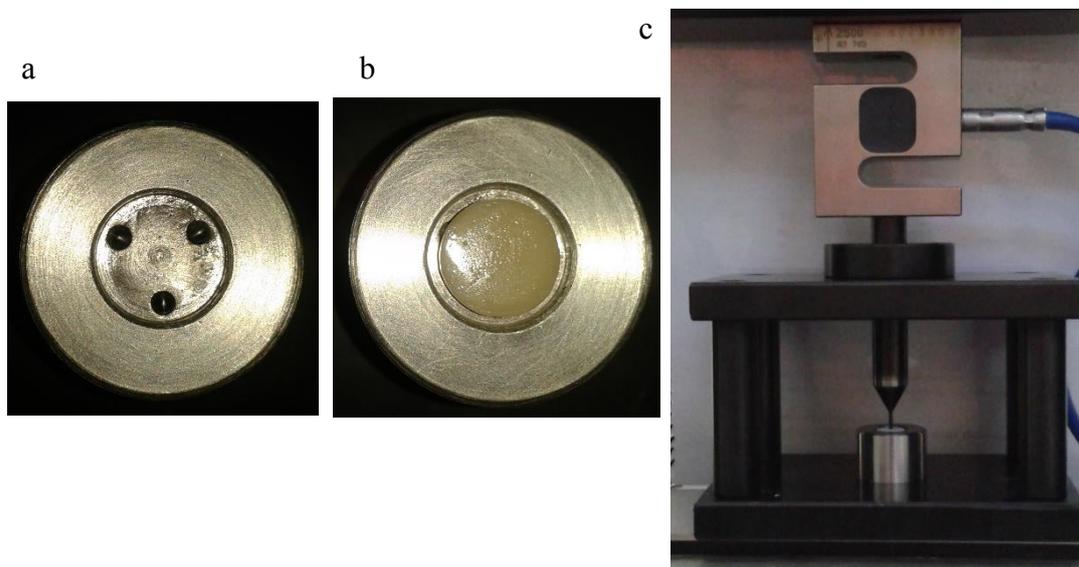
Figura 14 - Corpo-de-prova PM9 monocamada após acabamento e polimento.



### 4.2.3 Ensaio de flexão biaxial

Os espécimes de cada material foram submetidos ao ensaio de resistência à flexão biaxial (piston-on-three-ball test), de acordo com a norma ISO 6872 para materiais cerâmicos odontológicos<sup>30</sup>, na máquina de ensaios universal (DL 2000, EMIC, São José dos Pinhais, PR, Brazil) (Figura 15). Cada corpo-de-prova foi posicionado centralmente em três esferas de aço endurecido com diâmetro de 2,5 mm posicionadas a 120° entre si, formando uma área circular de apoio com um diâmetro de 10 mm. O corpo-de-prova foi posicionado concentricamente nestes suportes e a carga foi aplicada com um pistão de ponta ativa plana de diâmetro de 1,4 mm no centro do espécime.

Figura 15 - 15.a) Dispositivo contendo esferas de aço; 15.b) Espécime monocamada posicionado sobre as esferas de aço; 15.c) Ensaio de flexão biaxial (dispositivo completo em teste).



Para o cálculo da resistência à flexão biaxial ( $\sigma$ ), em megapascal, a seguinte equação foi utilizada:

$$\sigma = -0,238 \frac{7P(X-Y)}{b^2}$$

onde:

$\sigma$ : é o estresse de tração máximo, em megapascal;

P: é o total de carga que causa fratura, em Newtons

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

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

b: é a espessura do espécime na origem da fratura em milímetros

na qual:

$\nu$ : coeficiente de Poisson (se o valor para a porcelana em questão não é conhecida, use 0,25)

- $r_1$ : raio do círculo de apoio em milímetros  
 $r_2$ : raio da área que sofre carga, em milímetros  
 $r_3$ : raio do espécime, em milímetros

#### 4.2.4 Dureza Vickers

Um fragmento de cada corpo-de-prova do ensaio de flexão foi utilizado para a realização deste ensaio (n=15). Para a obtenção dos valores de dureza foi empregado um microdurômetro modelo 1600-6300 (Buehler, Lake Bluff, Illinois, EUA) equipado com diamante Vickers. Foram realizadas quatro impressões por amostra, uma em cada quadrante, com carga de 10 kgf e tempo de aplicação de 30 segundos. O valor de dureza dado pelo microdurômetro em VHN de acordo com a seguinte equação para indentador piramidal com ângulos de 136°:

$$H_v = \frac{0,322P}{a^2 \operatorname{sen}(136^\circ)} = \frac{0,464P}{a^2}$$

onde:

2a: comprimento da diagonal da impressão deixada pelo indentador em  $\mu\text{m}$ ;

P: carga de endentação em N

#### 4.2.5 Tenacidade à fratura aparente

A metodologia utilizada para a determinação dos valores de tenacidade à fratura por ensaio de endentação Vickers das amostras seguiu a norma ASTM C 1421-99, a qual forneceu o método de teste padrão para a obtenção da tenacidade à fratura de cerâmicas avançadas em temperatura ambiente.

Os corpos-de-prova utilizados para este ensaio foram os mesmos utilizados para realização do ensaio de dureza. Cada impressão Vickers (n=15) apresentou dois pares de trincas radiais, sendo utilizadas aquelas que não apresentaram interações com imperfeições de polimento e desvios da trajetória da trinca nucleada a partir dos vértices das indentações. A medida do comprimento da maior trinca foi realizada 30 segundos após a indentação Vickers, buscando evitar o crescimento lento de trinca após a impressão, iniciado pelo campo de tensão que atua após o carregamento. A tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) foi calculada a partir da seguinte equação:

$$K_{IC} = 0,016 \left( \frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left( \frac{P}{C} \right)^{\frac{3}{2}}$$

onde:

$K_{IC}$  = tenacidade à fratura ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )

E = módulo de elasticidade do material ensaiado (GPa)

P = força aplicada no ensaio de dureza (N)

H = dureza Vickers (GPa) e

C = maior extensão lateral da fissura (m)

### 4.3 Confeção dos corpos-de-prova bicamada

Para este estudo, foram confeccionadas 60 discos (12 mm de diâmetro e 1 mm de espessura) em zircônia parcialmente estabilizada por ítrio (3Y-TZP). Para isso, os blocos de zircônia foram cortados em cortadora de precisão Isomet 1000 (Buehler, Lake Bluff, Illinois, EUA) cerca de 23% maior que o tamanho final. A sinterização foi realizada em forno do sistema Vita Zyrcomat (Vita Zahnfabrik, Bad Sackingen, Alemanha), com tempo de subida de 1,5 hora, temperatura final de 1530 °C, manutenção nesta temperatura por 2 horas e processo de resfriamento até 200 °C em forno, conforme recomendações do fabricante.

#### 4.3.1 Aplicação da porcelana feldspática VM9 sobre a zircônia

Os discos de zircônia (Figura 16a) foram previamente submetidos à limpeza, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Ciclo de limpeza térmica para receber a cerâmica feldspática VITA VM9 proposto pelo fabricante.

Programa	Inicial	Aquecimento	Resfriamento
Temperatura	600 °C	700 °C	Temp. Ambiente
Velocidade	-	55 °C/min	-
Patamar	3 min	5 min	-
Atmosfera	Ar	Ar	Ar

A porcelana feldspática VITA VM9 foi aplicada a uma das faces da zircônia sinterizada. Para isso, de acordo com as instruções do fabricante foi aplicada uma camada fluida de porcelana (Figura 16b), denominada “wash”, sobre a superfície da zircônia e sinterizada conforme apresentado na Tabela 6 (Figura 16c).

Tabela 6 - Ciclo de sinterização da camada “wash” de cerâmica feldspática VITA VM9 proposto pelo fabricante.

Programa	Inicial	Aquecimento/Sinterização	Resfriamento
Temperatura	500 °C	950 °C	Temp. Ambiente
Velocidade	-	55 °C/min	-
Patamar	2 min	1 min	-
Atmosfera	Ar	Vácuo	Ar

Figura 16 - a) Disco de zircônia sinterizada; b) Aplicação da camada de wash; c) Wash sinterizado sobre o disco de zircônia.



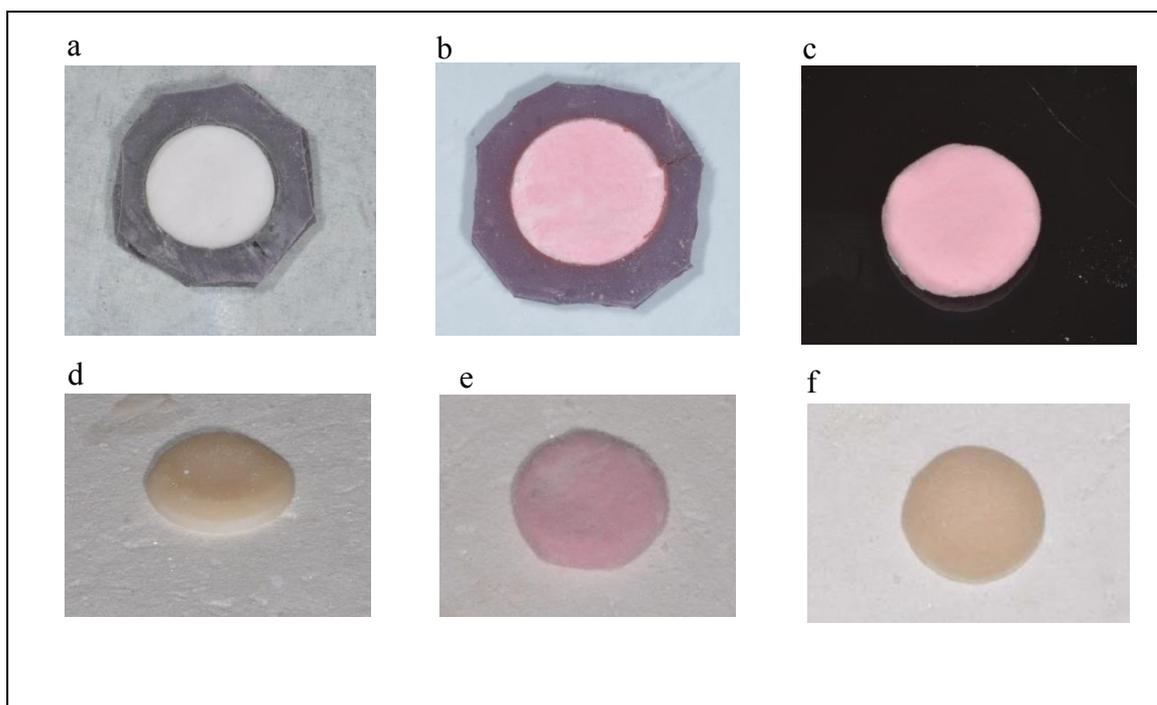
Após a confecção da camada de wash, a porcelana foi preparada pela mistura por saturação de massa padronizada do pó da porcelana Vita VM9 e do líquido de modelar Vita VM ModellingLiquid (VitaZahnfabrik, BadSäckingen, Alemanha)..Com o auxílio de uma matriz de elastômero (Impregum F, 3M ESPE, Seefeld, Alemanha) de dimensões 20% maiores em relação ao tamanho ideal dos corpos-de-prova para compensar a contração de sinterização da porcelana de cobertura, pequenas porções desta massa foram aplicadas e condensadas com uma espátula metálica para cerâmica até completar o molde.

Após a remoção do excesso do líquido com papel absorvente, o conjunto zircônia e porcelana foi removido da matriz e levado a uma manta de revestimento rígida (EDG, São Carlos, São Paulo, Brasil) para a sinterização no forno Alumini Press (EDG, São Carlos, São Paulo, Brasil) de acordo com o ciclo de aquecimento proposto pelo fabricante (Tabela 1). Uma segundo ciclo de queima, denominado “segunda queima” foi utilizado para correção das dimensões (Tabela 7). O processo de confecção está ilustrado na Figura 17.

Tabela 7 - Ciclo de sinterização de segunda queima da porcelana feldspática VITA VM9 proposto pelo fabricante.

Programa	Inicial	Aquecimento/Sinterização	Resfriamento
Temperatura	500 °C	900 °C	Temp. Ambiente
Velocidade	-	55 °C/min	*
Patamar	6 min	1 min	-
Atmosfera	Ar	Vácuo	Ar

Figura 17 - a) Disco de zircônia posicionado na matriz; b) Porcelana de cobertura VM9 aplicada na matriz, após secagem com papel absorvente; c) Corpo-de-prova removido da matriz; d) Corpo-de-prova após primeira queima demonstrando a contração de sinterização; e) Aplicação da segunda camada de Vita VM9; f) Corpo-de-prova após segunda queima.



O acabamento da face de porcelana dos espécimes foi feito conforme descrição prévia em 2.2.1 Os corpos-de-prova apresentaram as seguintes dimensões finais: espessura de 2 mm (1 mm de zircônia e 1 mm de porcelana) e diâmetro de 12mm.

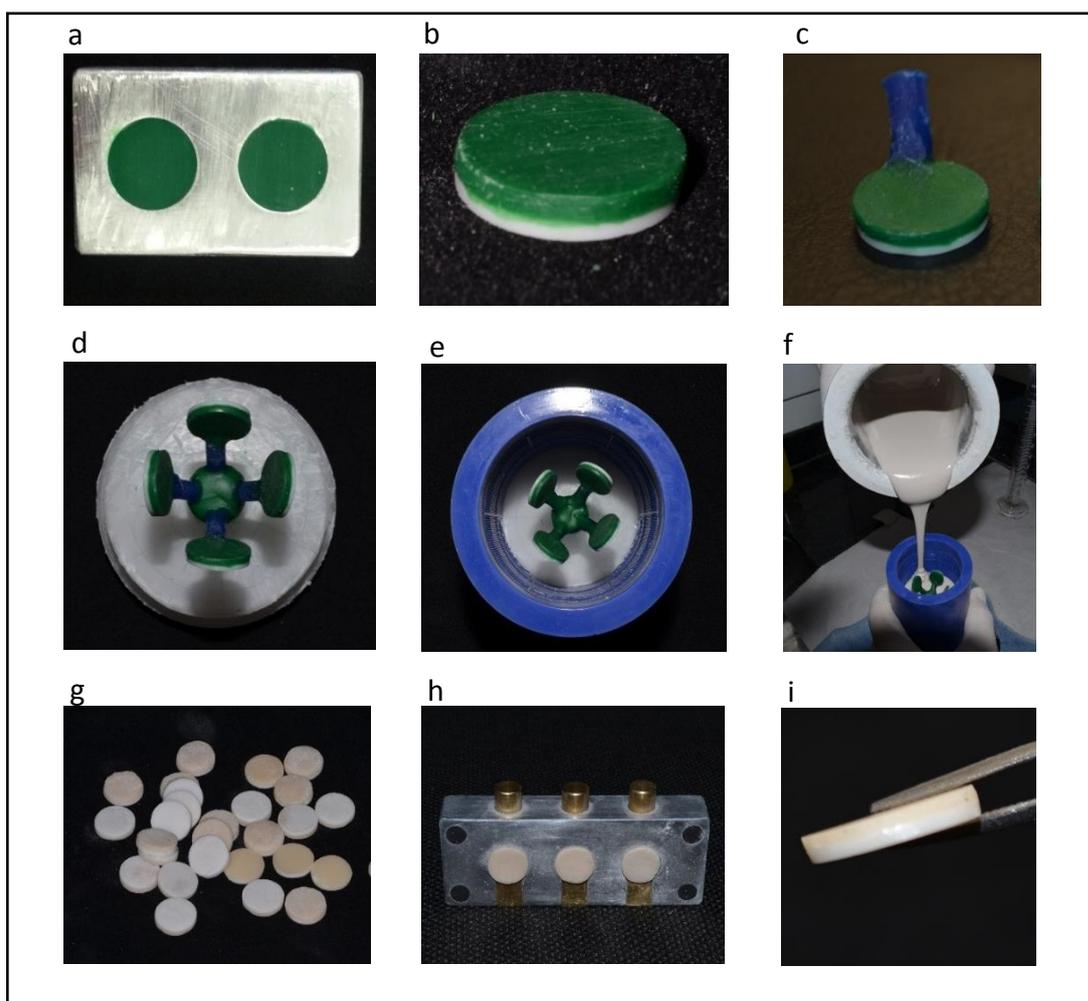
### **4.3.2 Aplicação da porcelana feldspática PM9 sobre a zircônia**

Com o auxílio de uma matriz metálica, foi realizado um enceramento sobre o disco de zircônia de 12 mm de diâmetro e 1,0mm de espessura, resultando em um disco bicamada com espessura final de 2,2 mm (1 mm de zircônia, 1,2 de cera). Conduitos de alimentação (sprues) foram confeccionados com fios de cera ligados aos padrões de cera e conectados à base formadora de cadinho próprios do sistema. Os sprues foram posicionados em ângulo de 45°, respeitando a distância mínima de 10 mm em relação à parede do anel de fundição.

Antes da inclusão, a massa da cera junto com os sprues injetáveis foi determinada para estimar a quantidade necessária de pastilhas injetáveis de VITA PM9. Foram utilizadas duas pastilhas de VITA PM9 para confeccionar 4 discos bicamada. O procedimento de inclusão, injeção e desinclusão ocorreu da mesma maneira que nos espécimes monocamada de PM9, descritos no texto anteriormente.

Após a prensagem, os procedimentos de acabamento foram feitos de acordo com o descrito previamente em 2.2.1. Os corpos-de-prova obtiveram conformação final de 12 mm de diâmetro e 2 mm de espessura (1 mm de zircônia e 1 mm de porcelana). A Figura 18 ilustra etapas de confecção dos espécimes bicamada de PM9.

Figura 18 - a) Dispositivo para enceramento sobre a zircônia; b) Disco de zircônia encerado; c) Disco de zircônia encerado unido ao sprue; d) Conjunto (Sprue +Corpo-de-prova encerado) conectados à base formadora de cadinho; e) Anel de fundição posicionado; f) Revestimento sendo vertido no anel de fundição; g) Espécimes de PM9 bicamada antes do acabamento e polimento; h) Espécimes de PM9 bicamada posicionados no dispositivo de polimento; i) Espécime bicamada de PM9 após acabamento e polimento.



### 4.3.3 Simulação da aplicação do Glaze

Após o acabamento e polimento, os corpos-de-prova de ambos os grupos foram submetidos a simulação do ciclo de queima do glaze (VITA Akzent Glaze Spray) de acordo com as instruções do fabricante (Tabela 8), Porém, para identificar o efeito da taxa de resfriamento da porcelana feldspática, os corpos-de-prova, confeccionados com os dois tipos de porcelana foram aleatoriamente divididos em sub-grupos:

- 1) Resfriamento rápido: remoção imediata do corpo-de-prova do forno logo após o fim da sinterização e manutenção deste em temperatura ambiente até que esta seja alcançada.
- 2) Resfriamento lento: resfriamento lento até a temperatura ambiente com forno desligado e fechado.

Tabela 8 - Ciclo de sinterização de glaze (VITA Akzent Glaze Spray) proposto pelo fabricante.

Programa	Inicial	Aquecimento	Resfriamento
Temperatura	500 °C	900 °C	Temp. Ambiente
Velocidade	-	80 °C/min	*
Patamar	4 min	1 min	-
Atmosfera	Ar	Vácuo	Ar

#### 4.3.4 Ensaio de resistência à flexão biaxial bicamada

Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio estático de flexão biaxial, conforme descrição em 2.2.3. A resistência à flexão biaxial bicamada foi obtida de acordo com cálculos descritos por Lin et al.<sup>36</sup>:

$$\sigma = \frac{6M}{t_a^2 K_{2p}} \left[ \frac{E_b t_b (1 - \nu_a^2)}{E_b t_b (1 - \nu_a^2)} + \frac{t_a (1 - \nu_a^2) \left(1 + \frac{t_b}{t_a}\right) \left(1 + \frac{E_a t_a}{E_b t_b}\right)}{t_b \left(1 + \frac{E_a t_a}{E_b t_b}\right)^2 - \left(\nu_a \frac{\nu_b E_a t_a}{E_b t_b}\right)^2} \right]$$

Nesta fórmula,  $\sigma$  é a resistência à flexão biaxial,  $M$  é o momento máximo de flexão,  $t_a$  e  $t_b$  são a espessura da zircônia e porcelana em milímetros, respectivamente,  $E_a$  e  $E_b$  são os módulos de elasticidade da zircônia (210 GPa) e porcelana (65 GPa), respectivamente. Os coeficientes de Poisson da zircônia ( $\nu_a$ ) e da porcelana ( $\nu_b$ ) foram 0,25. O valor de  $K_{2p}$  foi obtido pela seguinte fórmula:

$$K_{2p} = 1 + \frac{E_b t_b^3 (1 - \nu_a^2)}{E_a t_a^3 (1 - \nu_b^2)} + \frac{3(1 - \nu_a^2) \left(1 + \frac{t_b}{t_a}\right)^2 \left(1 + \frac{E_a t_a}{E_b t_b}\right)}{\left(1 + \frac{E_a t_a}{E_b t_b}\right)^2 - \left(\nu_a + \frac{\nu_b E_a t_a}{E_b t_b}\right)^2}$$

O valor de M foi obtido pela seguinte fórmula:

$$M = \frac{W}{4\pi} \left[ (1 + \nu) \log \frac{A}{R} + 1 \right],$$

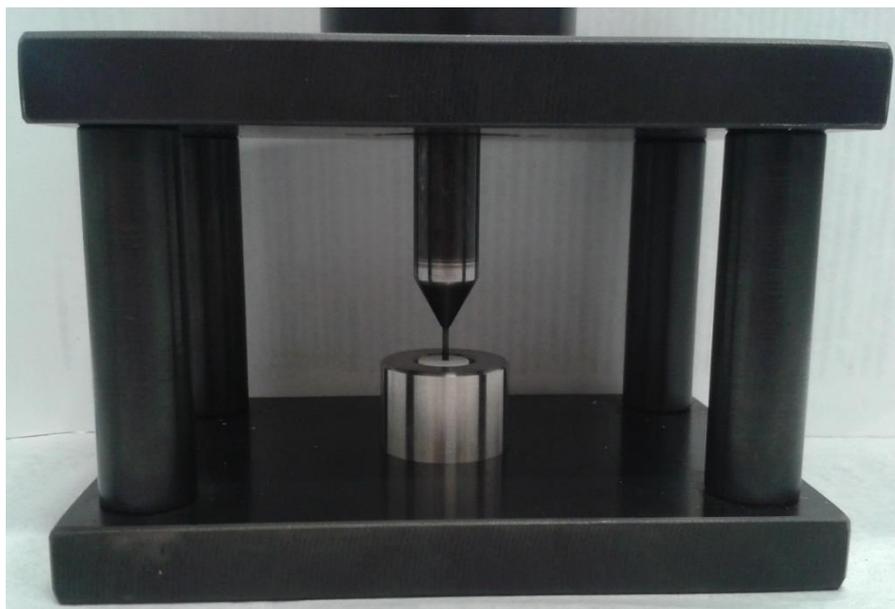
onde W é a carga de fratura,  $\nu$  o coeficiente de Poisson da amostra bicamada (0,25), A é o raio do suporte circular e R é o raio equivalente de carga, obtido por:

$$R = \sqrt{1.6B^2 + d^2} - 0.675d$$

onde B é o raio da ponta do pistão, d é a espessura total do corpo-de-prova bicamada.

No ensaio de flexão biaxial para os espécimes bicamada, a superfície da zircônia foi posicionada para cima, em contato com o pistão do dispositivo (Figura 19).

Figura 19 - Corpo-de-prova com a superfície de zircônia posicionada em contato com o pistão do dispositivo para ensaio de resistência à flexão biaxial bicamada.



Ao primeiro sinal sonoro de falha, o ensaio era interrompido e a força máxima obtida era anotada. Após o ensaio, o tipo de fratura foi observado por análise visual, sendo classificado em fratura apenas da porcelana, ou fratura completa (fratura tanto da porcelana quanto da zircônia).

#### **4.4 Planejamento experimental**

O volume amostral foi determinado por meio do plano piloto. Após a obtenção dos resultados, os dados foram avaliados quanto à distribuição (normalidade, homogeneidade e homocedasticidade) para, então, selecionar o teste estatístico a ser aplicado.

**RESULTADO**

---

## 5 RESULTADO

O teste de t student executado revelou valores significativamente maiores de resistência à flexão biaxial ( $p < 0,01$ ) e dureza ( $p = 0,017$ ) para as porcelanas prensadas de Vita PM9 quando comparadas as porcelanas convencionais Vita VM9. Nenhuma diferença estatisticamente significativa foi encontrada entre as porcelanas Vita PM9 e Vita VM9 em relação a tenacidade à fratura ( $p = 0,41$ ). Os valores encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de Resistência à flexão biaxial, dureza e tenacidade à fratura dos espécimes monocamada de porcelana de cobertura VM9 e PM9.

<b>Porcelanas de Cobertura</b>	<b>Resistência à flexão biaxial (MPa)</b>	<b>Dureza (Vickers)</b>	<b>Tenacidade à fratura (MPa.m<sup>1/2</sup>)</b>
<b>VM9</b>	82,7 ± 7,8 <sup>a</sup>	512,5 ± 43,7 <sup>a</sup>	1,5 ± 0,1 <sup>a</sup>
<b>PM9</b>	105,2 ± 10,8 <sup>b</sup>	563,32 ± 52,2 <sup>b</sup>	1,6 ± 0,1 <sup>a</sup>

\*letras diferentes na coluna indicam diferença estatística

Os resultados de resistência à flexão para os espécimes bicamada variando com os resfriamentos encontram-se na Tabela 11. O teste estatístico ANOVA a dois fatores (Tabela 10) foi significativo para o fator porcelana, ou seja, os espécimes bicamada com PM9 foram superiores aos espécimes bicamada com VM9 ( $p < 0,01$ ). Em relação ao fator método de resfriamento não foi encontrada diferença estatisticamente significativa, assim como quanto a interação entre fatores não foram significantes.

Tabela 10 - Teste estatístico ANOVA a dois fatores para espécimes bicamada.

Fonte de Variação	soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F	Sig.
Porcelana	40825,634	1	40825,634	25,820	0,001
Método de resfriamento	2497,440	1	2497,440	1,579	0,214
Porcelana X Resfriamento	3627,038	1	3627,038	2,294	0,136
Erro	88546,271	56	1581,183		
Total	2718331,91	60			
Total Corrigido	135496,382	59			

Tabela 11 - Valores de Resistência à flexão biaxial dos espécimes bicamada de VM9 e PM9 submetidos à resfriamento lento ou rápido.

<b>Resistência à flexão biaxial (MPa)</b>		
<b>Resfriamento</b>	<b>VM9</b>	<b>PM9</b>
<b>Lento</b>	167,1 ± 30,5	234,8 ± 49,1
<b>Rápido</b>	186,8 ± 51,4	232,2 ± 40,5

Em relação ao tipo de fratura, para o grupo VM9/zircônia foram encontradas 4 fraturas completas e 26 fraturas apenas da porcelana enquanto que para o grupo PM9/zircônia foram encontradas 10 fraturas completas e 20 fraturas apenas da porcelana.

**DISCUSSÃO**

---

---

## 6 DISCUSSÃO

No presente estudo, a porcelana prensada PM9 obteve valores significativamente maiores de resistência à flexão biaxial quando comparada a porcelana VM9 aplicada convencionalmente, o que poderia ser atribuído a estrutura mais homogênea alcançada com técnica de prensagem em relação a aplicação convencional, onde concentram-se os efeitos da porosidade interna, além da maior facilidade de acúmulo de outros erros técnicos. Da mesma forma, a dureza Vickers foi maior para a porcelana prensável. Por outro lado, os valores de tenacidade a fratura foram iguais. Ansong et al.<sup>7</sup> encontraram uma variedade de valores de tenacidade à fratura para porcelanas prensadas e convencionais tanto para Ivoclar-Vivadent como para Noritake. Para Ivoclar-Vivadent, a porcelana de aplicação convencional obteve valores significativamente maiores quando comparada com a prensada, enquanto que para Noritake o contrário foi observado, como porcelana prensada apresentando maiores valores em relação as porcelanas de aplicação convencional. No entanto, os autores afirmam que a magnitude das diferenças de valores de tenacidade à fratura entre porcelana prensada e convencional é muito pequena (embora estatisticamente diferente), supondo comportamento similar em uso clínico<sup>31</sup>.

A tenacidade à fratura indica o quanto um material resiste à propagação de trinca, porém não há um consenso em relação à melhor técnica a ser utilizada para mensurar tenacidade à fratura<sup>43</sup>. Em nosso estudo, a técnica da indentação foi utilizada para calcular a tenacidade à fratura. Este método requer espécimes pequenos e o parâmetro de crescimento de trincas é similar as trinca esperadas em condições clínicas<sup>52</sup>. No entanto, este método leva a uma maior dispersão de dados, devido às dificuldades de mensuração do comprimento da trinca com acurácia<sup>49</sup>. Por outro lado, Scherrer et al. encontraram valores similares de tenacidade à fratura para metodologias como barra com entalhe, barra com pré-indentação Vickers e fratura por indentação<sup>49</sup>. Em nosso estudo, um examinador calibrado executou o ensaio, e uma pequena dispersão de valores foi obtida, indicando a confiabilidade do teste.

Na literatura, não há um consenso de qual tipo de porcelana tem a melhor performance mecânica. Choi et al.<sup>14</sup>, compararam as porcelanas prensadas entre si e mostraram que as que continham leucita em sua composição apresentaram maior resistência à flexão e melhor adesão à zircônia em relação as porcelanas que não contém este cristal. Em elevadas temperaturas, os cristais de leucita passam de uma fase cúbica

para tetragonal, não sendo mais capaz de se retransformar após o resfriamento. Além do efeito no arranjo estrutural, também há um efeito no CET e nas propriedades mecânicas, conforme visto por Mackert, Evans<sup>37</sup>, que mostraram aumento significativo na quantidade de leucita em função do resfriamento lento. Devido à forte dependência do coeficiente de expansão térmica das porcelanas dentais no conteúdo de sua leucita, o resfriamento lento das restaurações metalocerâmicas seria capaz de produzir as mais variadas combinações metalocerâmicas tidas como termicamente incompatíveis. Mudanças na estrutura causam diferentes contrações térmicas entre a leucita e a matriz vítrea, o que contribui para o mecanismo de tenacificação das porcelanas que contém leucita. Em uma segunda parte dos estudos, Choi et al.<sup>13</sup> mostraram maiores valores de tenacidade à fratura para as porcelanas prensadas que contém leucita (Noritake CZR Press e Vita PM9) em relação as que não a contém (Wieland PressXzr e IPS e.max ZirPress). Em nosso estudo, as duas porcelanas utilizadas continham leucita, o que faz com que a comparação entre prensada e aplicada convencionalmente não tenha esta variável.

Embora possa haver diferença quanto às diferentes porcelanas de acordo com sua técnica de fabricação, seja ela prensada ou convencional, é válido observar as diferenças entre ambas quando estão recobrindo a infraestrutura. Por exemplo, alguns autores observaram melhores valores de resistência adesiva para as porcelanas aplicadas convencionalmente em relação às porcelanas prensadas<sup>3</sup>, enquanto que outro estudo não encontrou diferença estatística significativa<sup>32</sup>. Lin et al.<sup>36</sup> encontraram valores de resistência à flexão biaxial significativamente menor para espécimes com porcelanas aplicadas convencionalmente (IPS e.max ZirPress) sobre zircônia em relação aos espécimes com porcelanas prensadas (IPS e.max Ceram), ambas para infraestrutura IPS e.max ZirCAD, o que foi atribuído ao melhor molhamento e relação de contato entre zircônia e porcelana prensada, graças a aplicação de pressão e vácuo no momento da injeção, assim como foi observado por Aboushelib et al.<sup>3</sup>. Kim et al.<sup>33</sup> mostraram que coroas de zircônia recobertas com porcelana prensada (IPS e.max ZirPress LT) apresentaram carga para fratura significativamente maior quando comparado ao grupo com zircônia/porcelana convencional (IPS e.max Ceram). No grupo com porcelanas aplicadas convencionalmente, todas as fraturas ocorreram no corpo da porcelana, o que foi associado a sua baixa resistência, falhas técnicas e fragilidade estrutural causada por bolhas<sup>33</sup>. No entanto, no grupo com porcelana prensada, o modo de fratura foi geralmente uma fratura completa da infraestrutura e da porcelana, o que pode ser

explicado pela sua maior resistência e união mais forte com zircônia<sup>33</sup>. Em nosso estudo, o grupo com espécimes bicamada de zircônia/porcelana prensada PM9 apresentaram maiores valores de resistência à flexão biaxial quando comparada com o grupo bicamada de zircônia/porcelana convencional VM9. Além disso, o grupo contendo PM9 apresentou maior número de fraturas completas (tanto da zircônia como da porcelana), o que pode também indicar que a porcelana prensada tem melhor relação de contato com a infraestrutura de zircônia. Para Choi et al.<sup>15</sup>, a média de resistência à fratura não variou significativamente entre aplicação de porcelana convencional (Vita VM9) e prensada (IPS e.max ZirPress) sobre zircônia Lava. No entanto, um novo grupo estudado (porcelana sinterizada confeccionada via CAD/CAM – Lava™ DVS), apresentou valores significativamente maiores que os outros dois grupos, o que foi associado a alta qualidade do processo CAD/CAM, que diminui a quantidade de falhas quando comparada com a prensagem e aplicação convencional, que são feitos manualmente<sup>15</sup>.

Desta forma, a comparação da resistência das diferentes porcelanas torna-se importante, pois estes materiais para recobrimento são os mais frágeis neste tipo de restauração<sup>23</sup>. A baixa condutibilidade térmica associada à baixa difusividade térmica, tanto da zircônia como da porcelana resulta em formação de maiores gradientes térmicos, especialmente em seções mais espessas submetidas a um resfriamento rápido, resultando em maiores estresses residuais de têmpera<sup>54</sup>. Em comparação aos metais, que apresentam valores de condutibilidade térmica mais elevados, maiores gradientes térmicos são gerados nas cerâmicas, levando a maior formação de estresses residuais, que tem sido frequentemente associados aos lascamentos encontrados clinicamente nas restaurações zircônia/porcelana de cobertura<sup>9,39,41,56,57</sup>. De acordo com a análise de elemento finito nos estudos de Silva et al.<sup>53</sup>, os sistemas totalmente cerâmicos apresentaram maiores níveis de estresse residual na porcelana de cobertura e na zircônia, quando comparados às metalocerâmicas.

Recentemente, alguns autores tem avaliado e mensurado o estresse residual, através de diferentes técnicas, entre elas, o método dos elementos finitos<sup>12,20,21</sup>, hole-drilling<sup>38-42</sup>, indentação Vickers<sup>8,13</sup>, nanoindentação<sup>63</sup> e birrefringência<sup>9</sup>. De modo geral, estresses de compressão tem sido encontrados na superfície da porcelana de cobertura<sup>13,38,39,41,42</sup>. O padrão de estresse diminui progressivamente de acordo com a profundidade da porcelana, tornando ligeiramente de tração e então, tornando-se novamente de ligeira compressão<sup>39,41</sup>. Nos estudos de Mainjot et al.<sup>39</sup>, a magnitude dos

estresses de compressão na superfície foram maiores para o grupo com zircônia em relação ao grupo com metal, indicando maior desigualdade térmica.

Em um estudo<sup>38</sup>, stresses de compressão foram observados para sistemas metal/porcelana e ligeira tração para zircônia/porcelana. Estes stresses de tração encontrados na interface zircônia/porcelana podem ser responsáveis pelas maiores taxas de falha em restaurações deste sistema em relação à metalocerâmicas<sup>38</sup>. Os stresses de compressão na superfície podem ser justificados pelo efeito de têmpera, enquanto de compressão próximos a infraestrutura podem ser associados a incompatibilidade de CET<sup>41</sup>. Os stresses de compressão desenvolvidos devido à diferença positiva de CET são compensados por estresse de tração na infraestrutura<sup>41</sup>. A quantidade de estresse resultante na infraestrutura varia com a proporção entre a espessura da zircônia<sup>42</sup> e da porcelana<sup>41</sup>, e com as taxas de resfriamento<sup>38</sup>.

Sendo assim, para diminuir o estresse residual térmico, o resfriamento lento tem sido proposto em alguns estudos<sup>10,13,46,55,59</sup>, pois diminui o gradiente térmico formado, reduzindo, conseqüentemente, o estresse residual térmico gerado, que tem sido constantemente citado como uma das possíveis causas de lascamento da porcelana de cobertura. Em um estudo recente, Almeida-Junior et al.<sup>6</sup> destacaram a necessidade de se atentar a grande variabilidade de métodos de resfriamento que são descritos na literatura sem nenhuma padronização, tornando complicada a comparação dos resultados, além de não permitir uma conclusão consensual de qual método utilizar. Desse modo, há certa divergência no protocolo deste resfriamento lento, sendo em algumas ocasiões similar a um resfriamento denominado de normal ou clássico em outro estudo<sup>6</sup>. Dentre os vários protocolos descritos para resfriamento lento encontram-se: 6 minutos após o ciclo de glaze<sup>46</sup>; interrupção da descida de resfriamento do forno e manutenção do espécime dentro deste até 100 °C (30 a 40 minutos em média)<sup>13</sup>; manutenção do espécime no forno 30% aberto por 15 minutos até alcançar a temperatura ambiente<sup>55</sup>; forno desligado após sinterização e mantido fechado até 600°C para então ser aberto<sup>59</sup>; abertura do forno em 10% para que resfriasse até 200°C com taxa de resfriamento de 30°C/min<sup>10</sup>; taxa de resfriamento de 2°C/min em forno especial<sup>38,42</sup>. Em nosso estudo, o resfriamento lento ocorreu desligando-se o forno após a sinterização e mantendo os espécimes dentro deste fechado, sendo removidos somente quando alcançassem a temperatura ambiente. Dessa forma, até a temperatura ambiente, o resfriamento ocorreu de forma muito lenta. Já o resfriamento rápido foi conduzido através de remoção imediata do espécime do forno após a sinterização, entrando em contato com o ar ambiente.

Embora o resfriamento lento tenha sido cada vez mais indicado, alguns estudos observaram melhores resultados para o resfriamento rápido<sup>6,25,42</sup>. De acordo com Göstemeyer et al.<sup>25</sup>, o aumento da resistência adesiva no resfriamento rápido em seu estudo (remoção imediata do forno após sinterização para resfriar em ar ambiente) pode ser associado com um aumento da resistência à deformação flexural do espécime devido aos estresses de compressão gerados, que protegem a adesão entre infraestrutura e material de cobertura. No entanto, Almeida-Junior et al.<sup>6</sup> sugerem que o estresse de compressão gerado na porcelana de cobertura sob resfriamento rápido pode melhorar a resistência da superfície e desenvolver altos estresses de tração na interface zircônia/porcelana, levando a uma maior predominância de falha adesiva, como observado neste grupo em seu estudo, embora os valores de resistência à flexão tenham sido significativamente maiores em relação ao grupo com resfriamento lento. Mesmo assim, a confiabilidade estrutural dos espécimes com resfriamento rápido foi ligeiramente menor do que os resfriados de modo normal e lento<sup>6</sup>. Para Mainjot et al.<sup>42</sup>, embora o resfriamento lento (taxa de resfriamento de 2°C/min em forno especial) minimize os efeitos dos gradientes térmicos, os estresses residuais gerados mostraram uma tendência de ser mais de tração do que os que foram resfriados de maneira clássica (abertura do forno a 900 °C aguardando o resfriamento até a temperatura ambiente e removendo o espécime da manta a 200°C).

Neste estudo, nenhuma diferença estatisticamente significativa foi encontrada em relação aos resfriamentos. É importante comentar que os espécimes foram polidos antes da simulação da queima do glaze, sendo esta metodologia diferente quando comparada com outros estudos, onde os espécimes foram polidos após o método de resfriamento<sup>6,25</sup>. Em geral, estresses de compressão são encontrados na superfície da porcelana de cobertura em espécimes bicamada após a sinterização, e quando o polimento é realizado, a zona de compressão é aliviada<sup>28</sup>. Como estes estresses de compressão, gerados pelo efeito de têmpera são removidos, ocorre uma possível fragilização da porcelana, visto que estes estresses são benéficos para a resistência mecânica da porcelana. Neste estudo, nenhum polimento foi realizado após a simulação da queima de glaze, conseqüentemente, a zona de compressão da superfície da porcelana de cobertura não foi removida pelo polimento.

De um modo geral, mais estudos são necessários para se definir o correto protocolo de resfriamento da porcelana de cobertura após a sinterização. Um ponto importante a ser ressaltado é que até o exato momento ainda não foram realizados

estudos que avaliassem o efeito do resfriamento na performance mecânica das porcelanas prensadas. Além disso, é importante que sejam realizados estudos de fadiga ou estudos in vivo, variando os resfriamentos em coroas com coberturas de porcelanas convencionais e prensadas, para que se possa obter uma análise dinâmica deste sistema totalmente cerâmico com zircônia/porcelana de cobertura.



## 7 CONCLUSÃO

As porcelanas prensadas PM9 apresentam maiores valores de resistência à flexão biaxial e dureza Vickers quando comparada com a porcelana de aplicação convencional VM9. No entanto, nenhuma diferença estatística foi encontrada entre VM9 e PM9 em relação aos valores de tenacidade à fratura. Em relação aos corpos-de-prova bicamada, os espécimes zircônia/porcelana prensada PM9 apresentaram valores de resistência à flexão biaxial maiores que os espécimes zircônia/porcelana convencional VM9. Já o método de resfriamento não interferiu na resistência à flexão biaxial de ambos os materiais.

**REFERÊNCIAS**

---

## REFERÊNCIAS

1. Aboushelib MN, de Jager N, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Microtensile bond strength of different components of core veneered all-ceramic restorations. *Dent Mater.* 2005; 21(10): 984-91.
2. Aboushelib MN, Feilzer AJ, de Jager N, Kleverlaan CJ. Prestresses in bilayered all-ceramic restorations. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2008; 87(1): 139-45.
3. Aboushelib MN, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Microtensile bond strength of different components of core veneered all-ceramic restorations. Part II: zirconia veneering ceramics. *Dent Mater.* 2006; 22(9): 857-63.
4. Alhasanyah A, Vaidyanathan TK, Flinton RJ. Effect of core thickness differences on post-fatigue indentation fracture resistance of veneered zirconia crowns. *J Prosthodont.* 2013; 22(5): 383-90.
5. Almeida AA Jr, Adabo GL, Galvão BR, Longhini D, Santos C. Evaluation of mechanical properties of dental feldspathic porcelains for metal and zirconia core. *Mater Sci Forum.* 2012; 727-728: 1104-7.
6. Almeida AA Jr, Longhini D, Domingues NB, Santos C, Adabo GL. Effects of extreme cooling methods on mechanical properties and shear bond strength of bilayered porcelain/3Y-TZP specimens. *J Dent.* 2013; 41(4): 356-62.
7. Ansong R, Flinn B, Chung KH, Mancl L, Ishibe M, Raigrodski AJ. Fracture toughness of heat-pressed and layered ceramics. *J Prosthet Dent.* 2013; 109(4): 234-40.
8. Baldassarri M, Stappert CF, Wolff MS, Thompson VP, Zhang Y. Residual stresses in porcelain-veneered zirconia prostheses. *Dent Mater.* 2012; 28(8): 873-9.
9. Belli R, Monteiro S Jr, Baratieri LN, Katte H, Petschelt A, Lohbauer U. A photoelastic assessment of residual stresses in zirconia-veneer crowns. *J Dent Res.* 2012; 91(3): 316-20.

---

\* De acordo com o manual da FOAr/UNESP, adaptadas das normas Vancouver. Disponível no site: <http://www.foar.unesp.br/#!/biblioteca/normalizacao>

10. Belli R, Frankenberger R, Appelt A, Schmitt J, Baratieri LN, Greil P, et al. Thermal-induced residual stresses affect the lifetime of zirconia-veneer crowns. *Dent Mater.* 2013; 29(2): 181-90.
11. Belli R, Petschelt A, Lohbauer U. Thermal-induced residual stresses affect the fractographic patterns of zirconia-veneer dental prostheses. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2013; 21: 167-77.
12. Bonfante EA, Rafferty BT, Silva NR, Hanan JC, Rekow ED, Thompson VP, et al. Residual thermal stress simulation in three-dimensional molar crown systems: a finite element analysis. *J Prosthodont.* 2012; 21(7): 529-34.
13. Choi JE, Waddell JN, Swain MV. Pressed ceramics onto zirconia. Part 2: indentation fracture and influence of cooling rate on residual stresses. *Dent Mater.* 2011; 27(11): 1111-8.
14. Choi JE, Waddell JN, Torr B, Swain MV. Pressed ceramics onto zirconia. Part 1: comparison of crystalline phases present, adhesion to a zirconia system and flexural strength. *Dent Mater.* 2011; 27(12): 1204-12.
15. Choi YS, Kim SH, Lee JB, Han JS, Yeo IS. In vitro evaluation of fracture strength of zirconia restoration veneered with various ceramic materials. *J Adv Prosthodont.* 2012; 4(3): 162-9.
16. DeHoff PH, Anusavice KJ, Gotzen N. Viscoelastic finite element analysis of an all-ceramic fixed partial denture. *J Biomech.* 2006; 39(1): 40-8.
17. DeHoff PH, Barrett AA, Lee RB, Anusavice KJ. Thermal compatibility of dental ceramic systems using cylindrical and spherical geometries. *Dent Mater.* 2008; 24(6): 744-52.
18. Della Bona A, Anusavice KJ, DeHoff PH. Weibull analysis and flexural strength of hot-pressed core and veneered ceramic structures. *Dent Mater.* 2003; 19(7): 662-9.
19. Denry IL, Mackert JR, Holloway JA, Rosenstiel SF. Effect of cubic leucite stabilization on the flexural strength of feldspathic dental porcelain. *J Dent Res.* 1996; 75 (12): 1928-35.
20. Dittmer MP, Borchers L, Stiesch M, Kohorst P. Stress and distortions within zirconia-fixed dental prostheses due to the veneering process. *Acta Biomater.* 2009; 5(8): 3231-9.

21. Dittmer MP, Kohorst P, Borchers L, Stiesch-Scholz M. Finite element analysis of a four-unit all-ceramic fixed partial denture. *Acta Biomater.* 2009; 5(4): 1349-55.
22. Donovan TE. Factors essential for successful all-ceramic restorations. *J Am Dent Assoc.* 2008; 139 Suppl: 14S-8S.
23. Fischer J, Stawarczyk B, Hammerle CH. Flexural strength of veneering ceramics for zirconia. *J Dent.* 2008; 36(5): 316-21.
24. Fischer J, Stawarczyk B, Trottmann A, Hammerle CH. Impact of thermal misfit on shear strength of veneering ceramic/zirconia composites. *Dent Mater.* 2009; 25(4): 419-23.
25. Göstemeyer G, Jendras M, Dittmer MP, Bach F, Stiesch M, Kohorst P. Influence of cooling rate on zirconia/veneer interfacial adhesion. *Acta Biomater* 2010; 6(12): 4532-8.
26. Göstemeyer G, Jendras M, Borchers L, Bach FW, Stiesch M, Kohorst P. Effect of thermal expansion mismatch on the Y-TZP/veneer interfacial adhesion determined by strain energy release rate. *J Prosthodont Res.* 2012; 56(2): 93-101.
27. Guazzato M, Walton TR, Franklin W, Davis G, Bohl C, Klineberg I. Influence of thickness and cooling rate on development of spontaneous cracks in porcelain/zirconia structures. *Aust Dent J.* 2010; 55(3): 306-10.
28. Guazzato M, Quach L, Albakry M, Swain MV. Influence of surface and heat treatments on the flexural strength of Y-TZP dental ceramic. *J Dent.* 2005; 33(1): 9-18.
29. Guess PC, Kulis A, Witkowski S, Wolkewitz M, Zhang Y, Strub JR. Shear bond strengths between different zirconia cores and veneering ceramics and their susceptibility to thermocycling. *Dent Mater.* 2008; 24(11): 1556-67.
30. International Organization for Standardization. ISO 6872:2008. Dental ceramic. Geneva: ISO; 2008.
31. Isgrò G, Pallav P, van der Zel JM, Feilzer AJ. The influence of the veneering porcelain and different surface treatments on the biaxial flexural strength of a heat-pressed ceramic. *J Prosthet Dent.* 2003; 90(5): 465-73.
32. Ishibe M, Raigrodski AJ, Flinn BD, Chung KH, Spiekerman C, Winter RR. Shear bond strengths of pressed and layered veneering ceramics to high-noble alloy and zirconia cores. *J Prosthet Dent.* 2011; 106(1): 29-37.

33. Kim JH, Lee SJ, Park JS, Ryu JJ. Fracture load of monolithic CAD/CAM lithium disilicate ceramic crowns and veneered zirconia crowns as a posterior implant restoration. *Implant Dent.* 2013; 22(1): 66-70.
34. Komine F, Saito A, Kobayashi K, Koizuka M, Koizumi H, Matsumura H. Effect of cooling rate on shear bond strength of veneering porcelain to a zirconia ceramic material. *J Oral Sci* 2010; 52 (4): 647-52.
35. Lenz J, Thies M, Wollwage P, Schweizerhof K. A note on the temperature dependence of the flexural strength of a porcelain. *Dent Mater.* 2002; 18(7): 558-60.
36. Lin WS, Ercoli C, Feng C, Morton D. The effect of core material, veneering porcelain, and fabrication technique on the biaxial flexural strength and Weibull analysis of selected dental ceramics. *J Prosthodont.* 2012; 21(5): 353-62.
37. Mackert JR, Evans AL. Effect of cooling rate on leucite volume fraction in dental porcelains. *J Dent Res.* 1991; 70(2): 137-9.
38. Mainjot AK, Schajer GS, Vanheusden AJ, Sadoun MJ. Influence of cooling rate on residual stress profile in veneering ceramic: measurement by hole-drilling. *Dent Mater.* 2011; 27(9): 906-14.
39. Mainjot AK, Schajer GS, Vanheusden AJ, Sadoun MJ. Residual stress measurement in veneering ceramic by hole-drilling. *Dent Mater.* 2011; 27(5): 439-44.
40. Mainjot AK, Douillard T, Gremillard L, Sadoun MJ, Chevalier J. 3D-Characterization of the veneer-zirconia interface using FIB nano-tomography. *Dent Mater.* 2013; 29(2): 157-65.
41. Mainjot AK, Schajer GS, Vanheusden AJ, Sadoun MJ. Influence of veneer thickness on residual stress profile in veneering ceramic: measurement by hole-drilling. *Dent Mater.* 2012; 28(2): 160-7.
42. Mainjot AK, Schajer GS, Vanheusden AJ, Sadoun MJ. Influence of zirconia framework thickness on residual stress profile in veneering ceramic: measurement by hole-drilling. *Dent Mater.* 2012; 28(4): 378-84.
43. Millen CS, Reuben RL, Ibbetson RJ. The effect of coping/veneer thickness on the fracture toughness and residual stress of implant supported, cement retained zirconia and metal–ceramic crowns. *Dent Mater.* 2012; 28(10): e250-8.
44. Pjetursson BE, Sailer I, Zwahlen M, Hammerle CH. A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions

- after an observation period of at least 3 years. Part I: Single crowns. *Clin Oral Implants Res.* 2007; 18 Suppl 3: 73-85.
45. Rinke S, Schäfer S, Lange K, Gersdorff N, Roediger M. Practice-based clinical evaluation of metal–ceramic and zirconia molar crowns: 3-year results. *J Oral Rehabil.* 2013; 40(3): 228-37.
  46. Rues S, Kröger E, Müller D, Schmitter M. Effect of firing protocols on cohesive failure of all-ceramics crowns. *J Dent.* 2010; 38(12): 987-94.
  47. Sailer I, Feher A, Filser F, Gauckler LJ, Luthy H, Hammerle CH. Five year clinical results of zirconia frameworks for posterior fixed partial dentures. *Int J Prosthodont.* 2007; 20(4): 383-8.
  48. Sailer I, Pjetursson BE, Zwahlen M, Hammerle CH. A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part II: fixed dental prostheses. *Clin Oral Implants Res.* 2007; 18 Suppl 3: 86-96.
  49. Scherrer SS, Denry IL, Wiskott HW. Comparison of three fracture toughness testing techniques using a dental glass and a dental ceramic. *Dent Mater.* 1998; 14(4): 246-55.
  50. Schmitter M, Mueller D, Rues S. Chipping behaviour of all-ceramic crowns with zirconia framework and CAD/CAM manufactured veneer. *J Dent.* 2012; 40(2): 154-62.
  51. Schmitter M, Mueller D, Rues S. In vitro chipping behaviour of all-ceramic crowns with a zirconia framework and feldspathic veneering: comparison of CAD/CAM-produced veneer with manually layered veneer. *J Oral Rehabil.* 2013; 40(7): 519-25.
  52. Seghi RR, Denry IL, Rosenstiel SF. Relative fracture toughness and hardness of new dental ceramics. *J Prosthet Dent.* 1995; 74(2): 145-50.
  53. Silva NR, Bonfante E, Rafferty BT, Zavanelli RA, Martins LL, Rekow ED, et al. Conventional and modified veneered zirconia vs. metaloceramic: fatigue and finite element analysis. *J Prosthodont.* 2012; 21(6): 433-9.
  54. Swain MV. Unstable cracking (chipping) of veneering porcelain on all-ceramic dental crowns and fixed partial dentures. *Acta Biomater.* 2009; 5(5): 1668-77.
  55. Tan JP, Sederstrom D, Polansky JR, McLaren EA, White SN. The use of slow heating and slow cooling regimens to strengthen porcelain fused to zirconia. *J Prosthet Dent* 2012; 107(3): 163-9.

56. Taskonak B, Borges GA, Mecholsky JJ, Jr., Anusavice KJ, Moore BK, Yan J. The effects of viscoelastic parameters on residual stress development in a zirconia/glass bilayer dental ceramic. *Dent Mater.* 2008; 24(9): 1149-55.
57. Taskonak B, Mecholsky JJ, Jr., Anusavice KJ. Residual stresses in bilayer dental ceramics. *Biomaterials.* 2005; 26(16): 3235-41.
58. Teng J, Wang H, Liao Y, Liang X. Evaluation of a conditioning method to improve core-veneer bond strength of zirconia restorations. *J Prosthet Dent.* 2012; 107(6): 380-7.
59. Tholey MJ, Swain MV, Thiel N. Thermal gradients and residual stresses in veneered Y-TZP frameworks. *Dent Mater.* 2011; 27(11): 1102-10.
60. Tholey MJ, Swain MV, Thiel N. SEM observations of porcelain Y-TZP interface. *Dent Mater.* 2009; 25(7): 857-62.
61. White SN, Miklus VG, McLaren EA, Lang LA, Caputo AA. Flexural strength of a layered zirconia and porcelain dental all-ceramic system. *J Prosthet Dent.* 2005; 94(2): 125-31.
62. Yilmaz H, Nemli SK, Aydin C, Bal BT, Tıraş T. Effect of fatigue on biaxial flexural strength of bilayered porcelain/zirconia (Y-TZP) dental ceramics. *Dent Mater.* 2011; 27(8): 786-95.
63. Zhang Y, Allahkarami M, Hanan JC. Measuring residual stress in ceramic zirconia-porcelain dental crowns by nanoindentation. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2012; 6: 120-7.
64. Zhang Z, Li Q, Li W, Swain M. Transient modelling of thermal processing for ceramic prostheses. *J Austr Ceram Society.* 2009; 45(2): 40-8.
65. Zhang Z, Zhou S, Li Q, Li W, Swain MV. Sensitivity analysis of bi-layered ceramic dental restorations. *Dent Mater.* 2012; 28(2): e6-14.

Autorizo a reprodução deste trabalho  
(Direitos de publicação reservado ao autor)

Araraquara, 20 de fevereiro de 2014

DIOGO LONGHINI