RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 05/07/2028.

UNESP - Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Odontologia de Araraquara

Ana Clara Bortolucci Saggioro

Processamento cerâmico de resíduos de zircônia fresada pelo sistema CAD-CAM: caracterização microestrutural e mecânica

Araraquara

2024

UNESP - Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Odontologia de Araraquara

Ana Clara Bortolucci Saggioro

Processamento cerâmico de resíduos de zircônia fresada pelo sistema CAD-CAM: caracterização microestrutural e mecânica

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia – Área de Prótese da Faculdade de Odontologia de Araraquara – UNESP, no exame de para obtenção de Título de Doutor em Reabilitação Oral.

Orientadora: Profª Drª Lígia Antunes Pereira Pinelli

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Salomão, Escola de Engenharia de São Carlos- USP.

Araraquara

2024

S129p

Saggioro, Ana Clara Bortolucci
Processamento cerâmico de resíduos de zircônia fresada pelo sistema CAD-CAM: caracterização microestrutural e mecânica / Ana Clara Bortolucci Saggioro. -- Araraquara, 2024
60 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara
Orientadora: Lígia Antunes Pereira Pinelli
Coorientador: Rafael Salomão

1. Zircônio. 2. Cerâmica. 3. Reciclagem. 4. Materiais dentários. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Ana Clara Bortolucci Saggioro

Processamento cerâmico de resíduos de zircônia fresada pelo sistema CAD-CAM: Caracterização microestrutural e mecânica

Comissão julgadora

Tese para obtenção do grau de Doutor

Presidente e orientador Profª Drª Lígia Antunes Pereira Pinelli

2º Examinador Prof. Dr. Rogério Margonar

3º Examinador Profª Drª Daniela Atili Brandini de Weert

4º Examinador Profª Drª Renata Garcia Fonseca

Araraquara, 05 de Julho de 2024.

DADOS CURRICULARES

Ana Clara Bortolucci Saggioro

NASCIMENTO: 09/07/1993 – Jaú – SP

FILIAÇÃO: Pai – Benedito Luiz Saggioro
Mãe – Sueli Maria Bortolucci Saggioro

2011 - 2016	Graduação em Odontologia- Faculdade de Odontologia de Araraquara- UNESP.
2018 - 2019	Mestrado em Reabilitação Oral, Área de Prótese, Faculdade de Odontologia de Araraquara- UNESP.
2020-2024	Doutorado em Reabilitação Oral, Área de Prótese, Faculdade de Odontologia de Araraquara- UNESP.
2022-2024	Especialização em Prótese Dentária, Sociedade Educacional Herrero, Faculdade Herrero/Unidade de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à Deus, por colocar em minha vida as melhores pessoas para me guiar e estar ao meu lado, prontas para me ajudar a passar pelos desafios apresentados na minha vida e na minha pesquisa.

AGRADECIMENTOS

A UNESP, Pós-graduação em Odontologia e Departamento de Materiais Odontológicos e Próteses. Que me receberam para a realização dessa pesquisa.

À minha orientadora Lígia, uma verdadeira joia colocada no meu caminho, capaz de trazer o brilho nas dúvidas e incertezas enfrentadas nessa jornada. Espero ser eternamente sua aprendiz. Muito obrigada pela paciência e por toda a sabedoria que me passou que vai muito além de como fazer ciência.

Ao meu coorientador Rafael Salomão, que foi um grande professor de cerâmicas e química, e que me ajudou e socorreu no desenvolvimento dessa pesquisa. Obrigada por estar sempre disposto a me ajudar a resolver os desafios que encontramos e a paciência de explicar tão didaticamente as dúvidas que surgiram.

À Faculdade de Odontologia de Araraquara, nas pessoas da diretora Profª Drª Patricia P. Nordi Sasso Garcia e vice-diretora Profª Drª. Elaine Pereira da Silva Tagliaferro, por proporcionar não somente oportunidades acadêmicas, mas também oportunidade de conhecer pessoas maravilhosas

A Profa. Dra. Ana Carolina Pero, Chefe do Departamento de Materiais Odontológicos e Próteses, e ao Prof. Dr. Paulo Cerri,

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Odontologia pelo constante apoio e atenção.

Aos professores do Departamento de Materiais Odontológicos e Próteses, pelos ensinamentos transmitidos e pelo carinho e respeito e exemplo que sempre me dedicaram.

Aos funcionários do Departamento de Materiais Odontológicos e Próteses, por todo carinho e acolhimento que recebi de todos.

Aos funcionários da pós-graduação José Alexandre, Cristiano e Alessandra, pela paciência e profissionalismo.

Aos funcionários da biblioteca pela paciência e profissionalismo.

Aos Funcionários Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo-USP que me acolheram, em especial ao Seu João, que foi extremamente solicito quando precisei utilizar o laboratório.

Ao Professor Murilo Camuri Crovace da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pelo auxílio na execução da prensagem isostática.

Ao Leandro Fernandes, por toda a dedicação e ensinamentos que me passou durante essa jornada.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica da Faculdade de Odontologia de Araraquara- Unesp.

Aos meus colegas Bruna, Luana, Taísa, Suellen e Bruno, meus grandes amigos e companheiros de pós-graduação, obrigado por estarem ao meu lado nessa aventura.

Aos meus pais Sueli e Benedito, que estiveram ao meu lado em toda essa jornada, acendendo aquela vela nos momentos mais difíceis e em cada vitória.

Aos meus irmãos, Lucas e André, e minha cunhada Mariana que sempre me deram exemplo de profissionalismo e perseverança.

Aos meus sobrinhos Manuela e João Lucas, que ao sorrirem me lembram o motivo pelo qual escolhi a odontologia como profissão

Aos meus avós Neusa e Osvaldo, que sempre estiveram ao meu lado e me ensinaram a respeitar todos e fazer o bem sem olhar a quem.

Aos meus avós Pina e Zequinha (in memoriam) que me ensinaram que a felicidade está nas pequenas coisas e nas pessoas que nos rodeiam.

Aos meus tios, primos e família que sempre me inspiraram a ser uma pessoa melhor, em todos os âmbitos da minha vida. Em especial meu tio Airton e minhas tias Maria Angela e Angela Maria, que me inspiraram a seguir o meu caminho profissional.

Ao meu primo Felipe, que mais que primo é um irmão, e sua esposa Ana Paula, que me ensinaram a ver o mundo por um ângulo diferente, a descobrir novos caminhos, novas oportunidades que antes eu acreditava estar fora de meu alcance.

Ao Luiz Avanço e sua família, que me acolheram em sua casa, me dando alegrias incontáveis e me socorrendo de problemas do dia a dia mais difíceis até a simples captura de um pequeno e torpe grilo. Obrigada por serem minha família de Araraquara.

Aos meus amigos Maria Carolina, Willian, Vinícius, Laís, André, Fabio, Felipe, Patrícia e Alexandre por estarem ao meu lado nos altos e baixos, estando perto e longe, por toda a alegria proporcionada e principalmente agradeço por nossa amizade.

À

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo nº 2010/19274-5), pelo apoio financeiro essencial para a realização dessa pesquisa.

À CAPES:

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

““De certa forma não posso acreditar que haja tantas alturas para serem escaladas por um homem que sabe o segredo dos sonhos tornarem-se realidade. Esse segredo especial pode ser resumido em quatro C’s. Eles são curiosidade, coragem, confiança e consistência. E o maior de todos eles é a Confiança. Quando você acredita em uma coisa, você acredita nela até o fim.”

Walt Disney*

* Miss Teenage America, organization. Miss Teenage America tells how to make the good things happen. New York: Abelard-Schuman; 1976. p. 425.

Saggioro ACB. Processamento cerâmico de resíduos de zircônia fresada pelo sistema CAD-CAM: caracterização microestrutural e mecânica. [Tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2024.

RESUMO

A zircônia (ZrO_2) é uma cerâmica utilizada na produção de próteses por manufatura subtrativa que gera grande quantidade de resíduos. A coleta e o reaproveitamento desse material mostram potencial de reutilização tanto em odontologia quanto em outras áreas como refratários e abrasivos. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi propor um método de processamento cerâmico para aproveitamento do descarte gerado pela fresagem de zircônias. Três grupos foram confeccionados: controle (ZZC, ZrO_2 fresada), ZrO_2 reciclada prensada uniaxialmente (ZZUNI) e ZrO_2 reciclada prensada isostaticamente (ZZISO). Para os grupos experimentais, blocos já fresados foram cominuídos em moinho de esferas (90 rpm) por 168 h para confecção dos espécimes. As suspensões foram secas em estufa (60 °C/ 24h) e prensadas uniaxialmente (113 MPa/1 min) ou unixialmente e isostaticamente (200 MPa/1 min) em discos (18 mm Ø X 2 mm) (n=15/grupo). Foi realizada pré-sinterização (1000 °C/2 h), polimento manual e sinterização (1450 °C/3 h) (12 mm Ø X 1,5 mm). Os espécimes foram avaliados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX), densidade aparente e relativa, porosidade total, dureza, resistência à flexão biaxial (RFB, 5kN, 0,5 mm/min) e módulo de Weibull (*m*). Os dados de RFB e dureza foram analisados pelo teste Anova um fator seguido pelo pós-teste de Tukey ($p < 0,05$). As imagens de MEV mostram o grupo ZZC com microestrutura mais homogênea. A fase tetragonal foi a mais predominante em todos os grupos, sem presença de contaminantes. A densidade relativa (%) /porosidade total (%) foi ZZC= 94,7/4,5 %; ZZUNI= 63,8/36,2 % e ZZISO= 80,4/ 19,7%. A dureza (GPa) foi: ZZC= 7,59, ZZUNI= 7,08 e ZZISO= 8,01, sem diferença estatisticamente significante entre os grupos. Os valores de RFB (MPa) foram: ZZC= 931,50; ZZUNI= 872,01 e ZZISO= 854,56, sem diferença estatisticamente significante entre os grupos. Os valores de *m* foram ZZC= 6,79; ZZUNI= 6,85 e ZZISO= 6,63. Concluiu-se que o método proposto para a reciclagem de zircônia foi eficaz para reproduzir as características do grupo controle e pode ser utilizado por empresas para reaproveitar esse material e devolvê-lo ao mercado.

Palavras-chave: Zircônio. Cerâmica. Reciclagem. Materiais dentários

Saggioro ACB. Ceramic processing of zirconia waste generated by CAD/CAM milling: microstructural and mechanical characterization [Tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2024.

ABSTRACT

Zirconia (ZrO_2) is a ceramic material used in the production of prostheses through subtractive manufacturing, which generates a large amount of waste. The collection and reuse of this material show potential for reuse in dentistry as well as in other areas such as refractories and abrasives. Therefore, the aim of this study was to propose a ceramic processing method for utilizing the waste generated by zirconia milling. Three groups were prepared: control (ZZC, milled ZrO_2), uniaxially pressed recycled ZrO_2 (ZZUNI), and isostatically pressed recycled ZrO_2 (ZZISO). For the experimental groups, already milled blocks were comminuted in a ball mill (90 rpm) for different milling times, with 168 h adopted for specimen fabrication. The suspensions were dried in an oven (60°C/24h) and uniaxially pressed (113 MPa/1 min) or uniaxially and isostatically pressed (200 MPa/1 min) into discs (18 mm Ø X 2 mm) (n=15/group). Pre-sintering (1000°C/2 h), manual polishing, and sintering (1450°C/3 h) were performed (12 mm Ø X 1.5 mm). The specimens were evaluated by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), apparent and relative density, total porosity, hardness, biaxial flexural strength (BFS, 5kN, 0.5 mm/min), and Weibull modulus (*m*). RF and hardness data were analyzed by one-way ANOVA followed by Tukey's post-test ($p < 0.05$). SEM images showed the ZZC group with a more homogeneous microstructure. The tetragonal phase was the most predominant in all groups, with no presence of contaminants. The relative density (%)/total porosity (%) was ZZC= 94.7/4.5%; ZZUNI= 63.8/36.2%; and ZZISO= 80.4/19.7%. The hardness (GPa) was: ZZC= 7.59, ZZUNI= 7.08, and ZZISO= 8.01, with no statistically significant difference between the groups. BFS values (MPa) were: ZZC= 931.50; ZZUNI= 872.01; and ZZISO= 854.56, with no statistically significant difference between the groups. The m values were ZZC= 6.79; ZZUNI= 6.85; and ZZISO= 6.63. It was concluded that the proposed method for zirconia recycling was effective in reproducing the characteristics of the control group and can be used by companies to reuse this material and reintroduce it to the market.

Keywords Zirconium. Ceramics. Recycling. Dental materials

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9

2 PROPOSIÇÃO 13
2.1 Objetivos Específicos 13

3 REVISÃO DA LITERATURA 15

4 MATERIAL E MÉTODO 31
4.1 Etapa 1 31
4.1.1 Tempo de moagem e cálculo do tamanho de partículas 32
4.1.2 Difração de raios X 32
4.1.3 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) 32
4.1.4 Determinação da densidade e porosidade total 33
4.1.5 Dureza vickers 33
4.2 Etapa 2 34
4.2.1 Confecção dos espécimes 34
4.2.1.1 Espécimes controle (ZZC) 34
4.2.1.2 Espécimes experimentais (ZZUNI e ZZISO) 35
4.2.2 Caracterização dos materiais 37
4.2.3 Dureza Vickers 37
4.2.4 Resistência à flexão braxial 37
4.2.5 Módulo de Weibull 38
4.2.6 Análise dos resultados 38

5 RESULTADO 39
5.1. Etapa 1 39
5.1.1 Tempo de moagem e cálculo do tamanho de partículas 39
5.1.2 Difração de raios X 41
5.1.3 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) 42
5.1.4 Densidade e porosidade total 43
5.1.5 Dureza Vickers 44
5.2 Etapa 2 45
5.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 45
5.2.2 Difração de raios X 46
5.2.3 Densidade e porosidade 47
5.2.4 Dureza Vickers 48
5.2.5 Resistência à flexão biaxial 48
5.2.6 Módulo de Weibull 49

6 DISCUSSÃO 53

7 CONCLUSÃO 56

REFERÊNCIAS 57

1 INTRODUÇÃO

Próteses odontológicas produzidas a partir de materiais cerâmicos conseguem reabilitar pacientes com elevada qualidade estética associada a uma resistência satisfatória[1,2] contudo, são ainda consideradas de custo elevado. Diversos materiais podem ser empregados nessa aplicação, como o dissilicato de lítio ($Li_2Si_2O_5$), alumina (Al_2O_3) e zircônia tetragonal policristalina parcialmente estabilizada por ítria (ZrO_2)[2,3], sendo esta a mais utilizada quando há necessidade de elevados níveis de resistência à flexão (800 a 1000 MPa)[1,4-6], dureza (12 a 13 GPa)[7,8] , módulo elástico entre 200 e 215 GPa e tenacidade à fratura entre 6 e 8 MPa[9,10]. A zircônia é um material polimórfico, com três fases cristalinas: monoclínica (m), tetragonal (t) e cúbica(c)[4,5,11] que mudam de acordo com fatores termomecânicos e estão diretamente relacionadas à propriedade de tenacificação, devido a elas, quando submetida a um estresse mecânico sofrerem tenacificação, por meio de propagação estável de microtrincas e campos de tensões compressivas, ao invés de evoluir para fraturas catastróficas[2,12].

A zircônia parcialmente estabilizada com ítria domina o mercado odontológico e desde 2015, os fabricantes têm modificado o material, criando várias opções para o cirurgião-dentista. Tais modificações focam principalmente na quantidade de ítria (3-5 % mol), mudando assim a estrutura cristalina do material formando mais grãos cúbicos a medida que aumenta a quantidade de ítria e modificando suas propriedades óticas e mecânicas[13].

Com mais laboratórios aderindo aos sistemas CAD/CAM (computer-aided design/ computer-aided manufacturing) e com as boas propriedades das zircônias, as próteses feitas com este material são cada vez mais utilizadas. O processo CAD/CAM é uma tecnologia onde as peças são obtidas pelo desgaste controlado de material[14,15], considerado um método subtrativo, e que reduz falhas de fabricação de próteses dentárias confeccionadas por outros métodos como, por exemplo, porosidades, com um melhor controle de qualidade[16]. O método de fresagem macia, ou a

seco, é o mais utilizado para zircônia, e tem como vantagem a velocidade de fresagem, a redução na força de corte e menor desgaste das brocas, obtendo uma melhor qualidade de superfície fresada[17]. Por não necessitar de resfriamento, não há a utilização de água, o que evita a absorção de umidade no material e gera resíduos sólidos e particulados provenientes do disco usinado, com um descarte de aproximadamente 80% da massa inicial do material[18]. Essa informação levanta uma importante questão sobre reutilização e reciclagem de materiais.

Gouveia et al.[19], em 2017, realizaram um estudo onde aproveitaram o pó gerado pelo desgaste da zircônia durante a fabricação das peças protéticas. Nesse estudo, o rejeito em pó foi misturado nas proporções de 0 %, 5 %, 10 % e 50 % às partículas de zircônia ainda não processada gerando estruturas com resistência à flexão biaxial de aproximadamente 420 MPa, enquanto a zircônia comercial alcança por volta de 926 MPa. Em relação ao pó produzido como subproduto do desgaste realizado durante o processamento via CAD/CAM, deve-se considerar as contaminações que podem ocorrer, já que em um laboratório protético a fresadora não é apenas utilizada para o desgaste de zircônia, de modo que outros resíduos podem estar presentes. Há também a contaminação pelo material das fresas que desgastam a cerâmica. Portanto, seria mais interessante a reciclagem do bulk, ou seja, dos resíduos sólidos que sobram do disco usinado, pois tem menor chance de estarem contaminados.

O elemento zircônio (Zr) não é encontrado em sua forma pura na natureza, suas formas mais comuns são silicato de zircônio ($ZrSiO_4$) e a baddeyleyita (ZrO_2) ambas pouco abundantes em forma isolada[20]. A forma mais comum de se obter esse material é como subproduto da mineração de outras rochas que contenham em sua composição o elemento Zr, como um tipo específico de granito[20]. Em rochas básicas a proporção de Zr é de 4 mg/kg, em rochas intermediárias 150 mg/kg, em rochas sílicosas 200 mg/kg, em rochas alcalinas 820 g/kg e em carbonatitos 1.120 mg/kg[20] o que demonstra a grande variação desse elemento de acordo com a rocha minerada. O valor econômico intrínseco desse resíduo é impulsionado pelo seu potencial de reciclagem, conforme tentado por várias

empresas[19]. Do ponto de vista ambiental, há benefícios claros na reutilização e reciclagem desse material, já que ele não é encontrado de forma natural; os maiores sítios desse material são encontrados na Austrália, África do Sul e Moçambique, sendo que o maior produtor é a China. É um material finito que é considerado sempre uma mineração secundária, mesmo em seus maiores sítios, estima-se que para cada 1 kg de $ZrSiO_4$ minerados se consome 4 MJ de energia e é emitido 0,32 kg de CO_2, sendo assim o descarte desse material nobre resulta em perda e acarreta custos[21].

O fato de a zircônia ser utilizada em outros produtos fora da odontologia como agentes abrasivos, componentes usados com tubos de vácuo, materiais cirúrgicos, materiais de revestimento térmico, joias e biomateriais fez com que ocorresse um aumento da mineração com a produção de 850 toneladas métricas em 2000 para 1400 toneladas métricas em 2019[20].

Os benefícios na reutilização dos blocos descartados vão além do ponto de vista ambiental, já que com os resíduos reciclados seria possível reduzir o custo do material uma vez que o processamento de reciclagem é mais barato que a extração e purificação do material minerado[13]. Dessa forma o custo de próteses em zircônia também poderia ser reduzido o que facilita o acesso a mais pessoas ao uso de próteses livres de metal. Deve-se levar em conta ainda que a zircônia com alta pureza, como a para uso biomédico, é de difícil acesso para outros setores industriais, assim se o material reciclado não se mostrar adequado para o uso odontológico, pode ser utilizado em setores alternativos, como fabricação de joias e materiais de revestimento térmico, mantendo um alto valor econômico e evitando perda financeira[19].

A reutilização da zircônia vai ao encontro também com a Lei 12.305/2010[22] no qual o governo brasileiro traçou estratégias para o manejo dos resíduos sólidos. Na seção II, artigo 30, foi instituída a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, abrangendo fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes a fim de compatibilizar interesses econômicos e sociais e promover o aproveitamento de resíduos sólidos ao direcioná-los para sua cadeia

produtiva ou para outras cadeias produtivas, o que diminui o desperdício de materiais, e estimula o desenvolvimento de mercado, produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis. Essa estratégia também compactua com os objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) das Nações Unidas, particularmente as de números 9 e 12[23,24]. A meta 9.4, que trata da modernização da infraestrutura das indústrias a fim de torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos até 2030, e a meta 12.4 onde busca assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis e alcançar o manejo ambientalmente sustentável de todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes e reduzir a liberação deste para o ar, água e solo.

Frente ao exposto, torna-se oportuno avaliar a utilização do descarte de blocos fresados de zircônia para confecção de novos blocos visando o reaproveitamento de um material considerado nobre. Entre os desafios a serem enfrentados destaca-se a avaliação do efeito das impurezas sobre a propriedades do novo produto e o desenvolvimento de uma rota de reciclagem efetiva e com custos competitivos.

7 CONCLUSÃO

Baseado na metodologia empregada foi possível concluir que o método de moagem e prensagem adotados foi capaz de produzir espécimes em zircônia reciclada com características equivalentes da zircônia fresada. Não houve diferença entre prensar uniaxialmente ou isostaticamente a frio.

REFERÊNCIAS*

1. Chevalier J. What future for zirconia as a biomaterial? Biomaterials. 2006; 27(4): 535-43.

2. Andreiuolo R, Gonçalves SA, Dias KRHC. A zircônia na odontologia restauradora. Rev Bras Odon RJ. 2011; 68(1): 49 – 53.

3. Alkharrat AR, Schmitter M, Rues S, Rammelsberg P. Fracture behavior of all-ceramic, implant-supported, and tooth-implant-supported fixed dental prostheses. Clin Oral Investig. 2018; 22(4):1663-73.

4. Piconi C, Maccauro G. Zirconia as a ceramic biomaterial. Biomaterials. 1999; 20(1): 1-25.

5. Denry I, Kelly JR. State of the art of zirconia for dental applications. Dent Mater. 2008; 24(3): 299 – 307.

6. Vagkopoulou T, Koutayas SO, Koidis P, Strub JR. Zirconia in dentistry: Part 1. Discovering the nature of an upcoming ceramic. Eur J Esthet Dent. 2009; 4(2):130 – 51.

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

8. Guazzato M, Albakry M, Ringer SP, Swain MV. Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic materials. Part II. Zirconia-based dental ceramics. Dent Mater. 2004; 20(5): 449-56.

9. White SN, Miklus VG, McLaren EA, Lang LA, Caputo AA. Flexural strength of a layered zircônia and porcelain dental all-ceramic system. J Prosthet Dent. 2005; 94(2): 125 – 31

10. Wang H, Aboushelib MN, Feizer AJ. Strength influencing variables on CAD/CAM zirconia Frameworks. Dent Mater. 2008; 24(5): 633 – 8

11. Hannink RJH, Kelly PM, Muddle BC. Transformation Toughening in Zircônia-Containing Ceramics. J Am Ceram. Soc,2000. 83(3): 461-87

* De acordo com o Guia de Trabalhos Acadêmicos da FOAr, adaptado das Normas Vancouver. Disponível no site da Biblioteca: http://www.foar.unesp.br/Home/Biblioteca/guia-de-normalizacao-atualizado.pdf

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

13. Stawarczyk B, Keul C, Eichberger M, Figge D, Edelhoff D, Lümkemann N. Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part I. Quintessence Int. 2017; 48(5): 369-80

14. Rekow D, Thompson VP. Near-surface damage-a persistent problem in crowns obtained by computer-aided design and manufacturing. Proc Inst Mech Eng H: 2005; 219(4): 233-43.

15. Abduo J, Lyons K, Bennamoun M. Trends in computer-aided manufacturing in prosthodontics: a review of the available streams. Int. J. Dent. 2014; 2014:783948.

16. Abduo J, Lyons K. Rationale for the use of CAD/CAM technology in implant prosthodontics. Int J Dent. 2013; 2013:768121.

17. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. Br Dent J. 2008; 10;204(9):505-11.

18. Tao, J., Chen, Z., Yu, S., Liu, Z. Integration of life cycle assessment with computer-aided product development by a feature-based approach. J. Clean. Prod. 2017; 143:1144-1164.

19. Gouveia PF, Schabbach LM, Souza JCM, Henriques B, Labrincha JA,et al. New perspectives for recycling dental zircônia waste resulting from CAD/CAM manufacturing process. J Clean Prod. 2017; 152 (1): 454 – 463.

20. Shahid M, Ferrand E, Schreck E, Dumat C. Behavior and impact of zirconium in the soil-plant system: plant uptake and phytotoxicity. Rev Environ Contam Toxicol. 2013; 221:107-27.

21. Gediga, J., Morfino, A., Finkbeiner, M. et al. Life cycle assessment of zircon sand. Int J Life Cycle Assess.2019; 24, 1976–84.

22. Brasil. Lei 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Solidos. Diário Oficial da União 03 Ago 2010; 147:3

23. Nações Unidas Brasil. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): 9 indústria, inovação e infraestrutura. Brasíli, DF.: ONU; [200-] [acesso em: 10 março 2024]. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/9.

24. Nações Unidas Brasil. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): 12 consumo e produção responsáveis. Brasíli, DF.: ONU; [200-] [acesso em: 10 março 2024]. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12.

25. Eichler J, Rödel J, Eisele U, Hoffman M. Effect of grain size on mechanical properties of submicrometer 3Y-TZP: fracture strength and hydrothermal degradation. J Am Ceram Soc 2007; 90(9): 2830–6.

26. Kamiya M, Mori Y, Kojima T, Sasai R, Itoh H. Recycling process for yttria-stabilized tetragonal zirconia ceramics using a hydrothermal treatment. JMater Cycles Waste Manag. 2007; 9: 27–33.

27. Khamman O, Wongmaneerung R, Chaisan W, Yimnirun R, Supon A. Preparation of perovskite nanopowders by vibro-milling technique. J Alloys Compounds.2008;456.492-497

28. Garcia E, Mesquita-Guimarães J, Miranzo P, Osendi M, Porous Mullite and Mullite-ZrO2 Granules for Thermal Spraying Applications. Surface and Coatings Technology.2011; 205. 4304–11.

29. Pereira GK, Amaral M, Simoneti R, Rocha GC, Cesar PF, Valandro LF. Effect of grinding with diamond -disc and -bur on the mechanical behavior of a Y -TZP ceramic. J Mech Behav Biomed Mater. 2014; 37: 133-40

30. Osman RB, Swain MV. A Critical Review of Dental Implant Materials with an Emphasis on Titanium versus Zirconia. Materials (Basel). 2015; 5; 8(3):932-58.

31. Silva L, Acchar W, Silva VM. Study of the sintering dental ceramic waste from ZrO2-Y2O3 system. MSF. 2016;881:392–7.

32. Silva YBF, Acchar W, Silva VM. Feasibility study of zirconia waste recycling obtained during the machining of single and multiple dental prosthesis. Mater Sci Forum. 2016; 881: 387–91.

33. Sriboonpeng C, Nonkumwong J, Srisombat L, Ananta S. Effect of vibro-milling time on phase transformation and particle size of zirconia nanopowders derived from dental zirconia-based pre-sinter block debris. Warasan Khana Witthayasat Maha Witthayalai Chiang Mai. 2017; 44: 1100–12

34. Cossu CMFA, Pais Alves MFR, de Assis LCL. Magnago RdO, de Souza JVC,dos Santos C. Development and characterization of Al2O3 -ZrO2 composites using ZrO2 (Y2O3)-recycled as raw material. MSF. 2018; 912: 124–9

35. Hovakhti A, Alhavaz A, Qujeq D, Gholinia H, Enderajemi SAA, Pezeshki S, Firouzmanesh P. Zirconia recycling and evaluating the effect of wet and dry grinding, with or without heat treatment, flexural strength of this ceramic. Annals of Dental Specialty. 2018; 6: 250–5.

36. Grech J, Antunes E, Zirconia in dental prosthetics: A literature review,J. of Materials Research and Technology, 2019; 8(5): 4956-64

37. El-Eskandarany MS, Al-Hazza A, Al-Hajji LA, Ali N, Al-Duweesh AA, Banyan M, Al-Ajmi F. Mechanical Milling: A Superior Nanotechnological Tool for Fabrication of Nanocrystalline and Nanocomposite Materials. Nanomaterials (Basel). 2021 24; 11(10): 2484

38. Montalván-Olivares DM, Santana CS, Velasco FG, Luzardo FHM, Andrade SFR, Ticianelli RB et al. Contaminação multielementar em solos de grandes áreas de mineração no nordeste do Brasil. Environ Geochem Health. 2021; 43: 4553–76.

39. Ding H, Tsoi JKH, Kan C, Matinlinna JP. A simple solution to recycle and reuse dental CAD/CAM zirconia block from its waste residuals. J Prostho- dont Res. 2021; 65: 311–20.

40. Cordeiro VV, Rodrigues AM, Costa FP, Cartaxo JM, Lira HL, Menezes RR.The harnessing of the waste arising from Y-TZP dental ceramics manufac-tured by CAD/CAM to be used as alternative dental materials. Ceram Int.2022; 48: 36149-55

41. Yang H, Lu Z, Yang S, Cheng H, Yu H. Effects of powder size and presinteringheating rate on dental recycled zirconia. Zhonghua kou Qiang yi xue za zhi.2022; 57: 516-22

42. Campos TMB; dos Santos C; Alves LMM; Benalcazar-Jalkh EB; Strazzi-Sahyon HB; et al. Minimally processed recycled yttria-stabilized tetragonal zirconia for dental applications: Effect of sintering temperature on glass infiltration. JOUR. 2024; 150: 106311

43. ISO 6872:2015. Dentistry – ceramic materials. Int Organ Standadization 2015; 2015.