

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 02/03/2028.



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



Gabriel Gimenez Pedroso

**Caracterização da superfície do titânio após o tratamento com biovidro 45S5
obtido da casca do arroz associado ao Nióbio**

Araraquara

2026



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



Gabriel Gimenez Pedroso

**Caracterização da superfície do titânio após o tratamento com biovidro 45S5
obtido da casca do arroz associado ao Nióbio**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Odontologia de Araraquara para obtenção do título de Mestre em Odontologia, na Área de Reabilitação Oral.

Orientador: Luís Geraldo Vaz
Coorientador: Lucas David Galvani

Araraquara

2026

P372c

Pedroso, Gabriel Gimenez

Caracterização da superfície do titânio após o tratamento com biovidro 45S5 obtido da casca do arroz associado ao Nióbio / Gabriel Gimenez Pedroso. -- Araraquara, 2026

112 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara

Orientador: Luis Geraldo Vaz

Coorientador: Lucas David Galvani

1. Osseointegração. 2. Nióbio. 3. Propriedades de superfície. I. Título.

Gabriel Gimenez Pedroso

**Caracterização da superfície do titânio após o tratamento com biovidro 45S5
obtido da casca do arroz associado ao Nióbio**

Comissão julgadora

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Odontologia

Prof. Dr. Luís Geraldo Vaz

Prof(a). Dra. Daniela Leal Zandim Barcelos

Prof. Dr. Roberto Sales e Pessoa

Araraquara, 02 de março de 2026.

DADOS CURRICULARES

Gabriel Gimenez Pedroso

NASCIMENTO: 08/09/1999 – São Carlos – SP

FILIAÇÃO:

2018-2023: Graduação em Odontologia (FOAr/UNESP)

2024-atual: Especialização em Implantodontia (FAEPO)

2023: Curso de Extensão em Cirurgia Oral Menor (FAEPO)

2023: Curso de Extensão em Prótese Fixa Convencional e sobre Implante
(FOAr/UNESP)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, meu agradecimento mais profundo e cheio de amor. Nada disso existiria sem vocês: pelo esforço silencioso, pelas orações, por cada conselho, por nunca soltarem a minha mão e por me ensinarem a seguir em frente mesmo quando eu duvidava de mim. Vocês são a base de tudo o que eu sou e de tudo o que eu consegui construir até aqui.

À minha irmã e ao meu cunhado, obrigado por serem apoio e leveza. A presença de vocês, o carinho e a parceria fizeram diferença de verdade nessa caminhada, especialmente nos momentos mais puxados.

À minha noiva, meu amor e minha gratidão. Obrigado por acreditar em mim até quando eu estava cansado, por ter paciência com minhas ausências, por me acolher nos dias difíceis e comemorar comigo cada pequena vitória. Você tornou esse caminho mais bonito e me deu força para não desistir.

Ao meu orientador prof. Dr. Luis Geraldo Vaz, deixo meu reconhecimento pela orientação, confiança e disponibilidade, e por todas as contribuições que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, além do companheirismo construído.

Ao meu coorientador e colaboradores do grupo de pesquisa, obrigado pela dedicação, pela troca e pelo apoio em cada etapa, que ajudaram a tornar este trabalho possível.

Ao professor Dr. Joni Cirelli e colaboradores, obrigado pela disponibilidade em ceder o laboratório para a realização deste trabalho, bem como pelo apoio e confiança, que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Dr. Carlos Ventura, da Ufscar pela disponibilidade no uso de equipamentos, bem como pelo auxílio prestado nas análises, contribuições que foram de grande importância para a execução e qualidade deste trabalho.

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

Ao CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil - Processo nº (130840/2024-6) pelo apoio financeiro prestado para desenvolvimento desse estudo

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
(Processo nº 2024/13038-0) pelo apoio financeiro essencial para realização dessa
pesquisa.

“O mistério da vida me causa a mais forte emoção. É o sentimento que suscita a beleza e a verdade, cria a arte e a ciência. Se alguém não conhece esta sensação ou não pode mais experimentar espanto ou surpresa, já é um morto-vivo e seus olhos se cegaram.”
Albert Einstein*

* Einstein A. Como vejo o mundo. Rio de Janeiro: Nova Fronteira; 1981.

Pedroso GG. Caracterização da superfície do titânio após o tratamento com biovidro 45S5 obtido da casca do arroz associado ao Nióbio [dissertação de mestrado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2026.

RESUMO

O estudo analisou as características físico-químicas, mecânicas e biológicas da superfície de titânio grau IV que foi realizado a pulverização ultrassônica de recobrimentos de biovidro 45S5 puro e dopado com nióbio. Foram confeccionados discos de titânio grau IV, submetidos ou não ao pré-tratamento com jateamento associado a ataque ácido e, em seguida, recobertos com biovidro 45S5 puro ou dopado com nióbio. A caracterização foi realizada por rugosidade, microdureza Vickers, molhabilidade (ângulo de contato), microscopia eletrônica de varredura e EDS, além de ensaios in vitro com linhagem pré-osteoblástica MC3T3-E1 para morfologia e adesão, viabilidade metabólica (Alamar Blue), atividade de fosfatase alcalina e mineralização por Alizarina. Observou-se aumento de rugosidade com os recobrimentos em comparação ao grupo controle, com destaque para a condição dopada com nióbio e com pré-tratamento, enquanto o controle sem tratamento apresentou valores inferiores. A microdureza mostrou-se mais elevada nas condições com tratamento prévio e na dopagem com nióbio. A molhabilidade elevou-se acentuadamente com o biovidro, com ângulos de contato muito baixos nas superfícies recobertas, em contraste com valores mais altos nos controles. A análise em MEV-EDS indicou que o pré-tratamento favoreceu recobrimentos mais homogêneos e aderidos, ao passo que, sem pré-tratamento, ocorreu maior irregularidade e delaminação; o mapeamento químico confirmou elementos típicos do biovidro e distribuição homogênea do nióbio na camada dopada. Nos ensaios celulares, as superfícies dopadas com nióbio apresentaram adesão e espraçamento eficientes em 24 horas, progressão de confluência e organização de monocamada até 14 dias, sem indícios morfológicos de citotoxicidade. A viabilidade metabólica aumentou até 7 dias, com maiores valores nas condições dopadas com nióbio, especialmente com pré-tratamento, enquanto o biovidro sem pré-tratamento apresentou os menores valores no período final. A atividade de fosfatase alcalina aos 21 dias foi mais intensa na condição dopada com nióbio e pré-tratada, e a mineralização foi superior nos grupos recobertos em relação aos controles. Concluiu-se que a combinação entre pré-tratamento e recobrimento com biovidro 45S5, sobretudo quando dopado com nióbio, promoveu microtopografia mais favoráveis, elevada hidrofilicidade, estabilização do recobrimento e resposta celular compatível com citocompatibilidade e estímulo osteogênico inicial, indicando potencial para otimizar eventos associados à osseointegração, embora sejam recomendados estudos adicionais para aprofundar o impacto biológico do nióbio.

Palavras-chave: Osseointegração; Nióbio; Propriedades de superfície.

Pedroso GG. Characterization of the titanium surface after treatment with 45S5 bioglass obtained from rice husk associated with niobium. [dissertação de mestrado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2026.

ABSTRACT

This study analyzed the physicochemical, mechanical, and biological characteristics of the surface of grade IV titanium that underwent ultrasonic spraying of pure and niobium-doped 45S5 bioglass coatings. Grade IV titanium discs were manufactured, either pre-treated with blasting combined with acid etching or not, and then coated with pure or niobium-doped 45S5 bioglass. Characterization was performed using roughness, Vickers microhardness, wettability (contact angle), scanning electron microscopy, and EDS, in addition to in vitro assays with the MC3T3-E1 pre-osteoblastic cell line for morphology and adhesion, metabolic viability (Alamar Blue), alkaline phosphatase activity, and Alizarin mineralization. An increase in roughness was observed with the coatings compared to the control group, particularly in the niobium-doped and pre-treated conditions, while the untreated control showed lower values. Microhardness was higher in conditions with pre-treatment and niobium doping. Wettability increased markedly with the bioglass, with very low contact angles on the coated surfaces, in contrast to higher values in the controls. SEM-EDS analysis indicated that pre-treatment favored more homogeneous and adherent coatings, while without pre-treatment, greater irregularity and delamination occurred; chemical mapping confirmed typical bioglass elements and homogeneous niobium distribution in the doped layer. In cell assays, niobium-doped surfaces showed efficient adhesion and spreading within 24 hours, confluence progression and monolayer organization up to 14 days, without morphological evidence of cytotoxicity. Metabolic viability increased up to 7 days, with higher values in niobium-doped conditions, especially with pre-treatment, while the bioglass without pre-treatment showed the lowest values in the final period. Alkaline phosphatase activity at 21 days was more intense in the niobium-doped and pre-treated conditions, and mineralization was superior in the coated groups compared to the controls. It was concluded that the combination of pretreatment and coating with 45S5 bioglass, especially when doped with niobium, promoted more favorable microtopography, high hydrophilicity, coating stabilization, and a cellular response consistent with cytocompatibility and initial osteogenic stimulation, indicating potential to optimize events associated with osseointegration, although further studies are recommended to further investigate the biological impact of niobium.

Keywords: Osseointegration; Niobium; Surface Properties.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 PROPOSIÇÃO	13
2.1 Objetivos Específicos.....	13
2.2 Hipóteses Nulas.....	13
3 REVISÃO DA LITERATURA	14
3.1 Osseointegração e Tratamentos de Superfície em Implantes..	14
3.2 Biovidro 45S5.....	24
3.3 Dopagem do Biovidro.....	32
4 MATERIAL E MÉTODO	38
4.1 Divisão dos Grupos.....	39
4.2 Dopagem do Biovidro com Nióbio	40
4.3 Preparo das Amostras	40
4.4 Metodologia de Pulverização Ultrassônica das Amostras.....	41
4.5 Análises.....	42
4.5.1 Análise de rugosidade.....	42
4.5.2 Análise de dureza de Vickers.....	43
4.5.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV-FEG) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).....	43
4.5.4 Molhabilidade.....	43
4.5.5 Bioatividade por SBF.....	44
4.5.6 Cultivo e plaqueamento celular.....	44
4.5.7 Morfologia celular.....	45
4.5.8 Atividade de ALP.....	46
4.5.9 Ensaio de vermelho de Alizarina	46
4.5.10 Ensaio de viabilidade celular.....	46
4.6 Análise dos dados.....	47

5 RESULTADOS	48
5.1 Rugosidade.....	48
5.2 Dureza.....	50
5.3 Molhabilidade.....	52
5.4 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV-FEG) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).....	54
5.5 Bioatividade por SBF.....	58
5.6 Morfologia Celular, Adesão e Espraiamento.....	59
5.7 Viabilidade Celular.....	62
5.8 ALP e Alizarina.....	62
 6 DISCUSSÃO	 69
 7 CONCLUSÃO	 76
 REFERÊNCIAS	 77
 ANEXO	 81

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de implantes a partir de um processo de osseointegração foi fundamental para atingir o objetivo de promover a substituição de um único dente e até mesmo alcançar reabilitações orais extensas de pacientes edêntulos¹.

Inicialmente, a osseointegração foi definida por Branemark¹, em 1983, como uma associação estrutural e funcional que ocorre entre osso vivo e a superfície de um implante instalado com carga. A partir disso, iniciou-se um longo processo de estudos tanto sobre os materiais a serem utilizados como implantes propriamente ditos como também sobre alterações na superfície de implantes² para promover o processo de osseointegração¹.

Dentre os materiais, o mais amplamente na implantodontia é o titânio comercialmente puro, que se apresenta em diferentes graus de pureza (grau I a IV), variando de acordo com a quantidade de oxigênio presente em sua composição². O titânio apresenta diversas características que o fazem ser um material de referência a ser utilizado, uma vez que apresenta módulo de elasticidade mais próximo ao osso humano comparado ao aço inoxidável, além de resistência a corrosão, ser um material rígido que ao mesmo tempo permite ter sua macroestrutura alterada (maleável)³. Além disso, ele também se apresenta em duas fases de acordo com a temperatura: Fase α , que é abaixo de 882°C, apresentando uma estrutura hexagonal compactada; e Fase β , acima de 882°C, apresentando uma estrutura cúbica de corpo centrado^{2,3}.

Dessa maneira, uma estratégia utilizada para acelerar o processo de osseointegração é a adoção de implantes com superfícies modificadas⁴. Estas alterações físico-químicas visam aprimorar a estabilidade do coágulo, um fator crucial no processo de osseointegração, assim como permitir a maior formação óssea ao redor das roscas dos implantes⁵. Entre as características de superfície que favorecem a osteocondução dos implantes, destacam-se a topografia, composição química e molhabilidade⁶.

Sartoretto *et al.*⁵ explica que a superfície modificada por jateamento e ataque ácido, mantida em solução de cloreto de sódio, demonstrou acelerar e melhorar o processo de osseointegração (superfície hidrofílica) e que esse fenômeno está relacionado à camada de óxido presente na superfície do implante, a qual é mantida pela solução de cloreto de sódio em contato com a superfície até a instalação dos implantes, aumentando a molhabilidade da superfície.

Outro material amplamente estudado devido ao seu potencial osteoindutor, permitindo um processo de regeneração óssea acelerada, são os denominados vidros bioativos ou biovidros⁷. Dentro dessa classe, destaca-se a descoberta do biovidro 45S5 (Bioglass®), desenvolvido por Larry Hench⁸, o qual descobriu-se apresentar uma ligação química quando inserido em tecido ósseo. Estudos em animais evidenciam uma conexão osso-biovidro mais eficaz e rapidamente estabelecido do que com outras biocerâmicas, além de suas propriedades osteogênicas e osteoindutoras⁹.

A cadeia de mecanismos e reações do Bioglass 45S5 com o tecido ósseo é obtido a partir da formação de uma camada de hidroxiapatita carbonatada, descrito por Jones⁷. No processo descrito, o biovidro em contato com o fluido corporal promoveu a troca rápida dos cátions de Sódio (Na^+) ou cálcio (Ca^{2+}) com íons H^+ presente na solução, e gerou as ligações silanóis (Si-OH) na superfície do vidro, junto a elevação do pH da solução⁷. Em decorrência disso, tem-se o ataque da rede vítrea pelo OH, quebrando as ligações Si-O-Si, deixando mais Si-OH (silanóis) na interface da solução do biovidro, e promove sua condensação⁷. Então, grupos de cálcio (Ca^{2+}) e fosfato (PO_4^{3-}) migram para a superfície através da camada rica em sílica, e forma um filme rico em $\text{CaO-P}_2\text{O}_5$ amorfo na camada rica em sílica, que ao incorpora as hidroxilas e carbonatos, ocorre cristalização do filme de $\text{CaO-P}_2\text{O}_5$ em hidroxicarbonato-apatita (HCA)⁷.

Mediante esses achados de formação de hidroxiapatita que resultam em um maior estímulo ao processo de osteocondução e osteodiferenciação^{10,11}, diferentes processos para formação desse biovidro foram desenvolvidos. Dentre eles, tem-se o processo de obtenção de um material de alta pureza (cerca de 99.96%) a partir da sílica extraída da casca de arroz, fornecendo uma fonte de sílica amorfa com uma área superficial elevada, o que permite a produção de cerâmicas bioativas com elevada atividade biológica, como o Bioglass 45S5¹².

Em contrapartida, estudos ainda buscam potencializar as características físicas, químicas, mecânicas e biológicas do biovidro 45S5 através de processos de dopagem¹³, e, nos últimos anos, o nióbio destacou-se por resultados favoráveis relacionados biocompatibilidade¹⁴, como estudos realizados por Souza *et al.*¹⁴ e Fernandes *et al.*¹⁵, em que foi possível notar que a associação do nióbio ao biovidro 45S5 utilizados com enxerto ósseo revelou não somente a sua compatibilidade e respostas celulares favoráveis, tal qual induziram o processo de formação óssea. Em

superfícies de implantes, poucos foram os estudos feitos de pulverização do biovidro em superfícies de titânio¹⁶, já os materiais associados (biovidro 45S5 dopado de Nióbio) aplicados a tratamento de superfície não há evidências sólidas encontradas em artigos até o momento.

Esses indicativos também representam importantes avanços do ponto de vista econômico, pois o Brasil é o maior produtor mundial de Nióbio representando cerca de 89% da produção mundial¹⁷. Não obstante, também é importante ressaltar o estímulo ao uso de biomassa no processo de obtenção biovidro, que ocorre a partir da extração da sílica proveniente da casca do arroz¹². No cenário mundial, o Brasil destaca-se na produção de arroz, sendo o maior produtor fora da Ásia¹⁸. Do volume total produzido por ano pelo país (cerca de 15 milhões de toneladas), aproximadamente 20% corresponde em volume a casca de arroz, sendo, portanto, uma quantidade elevada e fonte de sílica amorfa com alto grau de pureza e área superficial específica¹⁸.

A partir esse cenário, o desenvolvimento de uma superfície com biovidro associado ao nióbio, representou a busca pela potencialização do processo de formação óssea¹⁵, e também proporcionar bioatividade da superfície dos implantes¹⁹, para viabilizar o processo de osseointegração. Simultaneamente, foi explorado mecanismos sustentáveis e economicamente viáveis ao desenvolvimento desse novo processo de tratamento de superfície como através de uma metodologia de pulverização ultrassônica que permitiu correlacionar o uso de menor quantidade de material a formação de um filme superficial fino e homogêneo²⁰.

Portanto, a sustentabilidade associada a meios viáveis de produção¹², juntamente ao potencial biológico do biovidro 45S5^{10,11} e sua associação ao Nióbio^{14,15} possuem, além do seu caráter inovador, uma importante viabilidade de aplicação na implantodontia, uma vez que a osteocondução, diferenciação celular e formação de matriz óssea é essencial para ocorrência da osseointegração^{16,19}.

7 CONCLUSÃO

Conclui-se que os tratamentos superficiais aplicados ao titânio modificaram a topografia e a química da superfície, com destaque ao grupo com pré-tratamento por jateamento seguido de ataque ácido combinado a pulverização de biovidro 45S5, especialmente quando dopado com nióbio. Nessa condição, observou-se um padrão mais favorável de rugosidade e microtopografia, maior homogeneidade e estabilização do recobrimento, como também redução do ângulo de contato para valores altamente hidrofílicos e manutenção de propriedades mecânicas superficiais sem prejuízo da integridade. Em paralelo, os ensaios biológicos indicaram citocompatibilidade e resposta celular favorável para os grupos contendo biovidro, que apresentou favorável espraçamento, confluência e sinalização de maturação osteogênica (ALP), assim como a mineralização *in vitro*. A associação ao nióbio também indica resultados favoráveis a viabilidade e proliferação, porém estudos mais aprofundados são necessários para analisar o seu impacto biológico mais detalhado.

Por fim, os resultados sustentam que a sinergia entre topografia favorável e bioatividade superficial é determinante para potencializar eventos iniciais associados à osseointegração.

REFERÊNCIAS*

1. Brånemark PI. Osseointegration and its experimental background. *J Prosthet Dent.* 1983; 50(3): 399-410.
2. Liu X, Chu P, Ding C. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Mater. Sci. Eng. R, Rep.* 2004; 47(3-4): 49-121.
3. Gilbert JRB. The uses of titanium. *Mater Sci Technol.* 1985; 1(4): 257-62.
4. Buser D, Broggini N, Wieland M, Schenk RK, Denzer AJ, Cochran DL, et al. Enhanced bone apposition to a chemically modified SLA titanium surface. *J Dent Res.* 2004; 83(7): 529-33.
5. Sartoretto SC, Alves AT, Resende RF, Calasans-Maia J, Granjeiro JM, Calasans-Maia MD. Early osseointegration driven by the surface chemistry and wettability of dental implants. *J Appl Oral Sci.* 2015; 23(3): 279-87.
6. Wennerberg A, Jimbo R, Stübinger S, Obrecht M, Dard M, Berner S. Nanostructures and hydrophilicity influence osseointegration: a biomechanical study in the rabbit tibia. *Clin Oral Implants Res.* 2014;25(9):1041-50.
7. Jones JR. Review of bioactive glass: from Hench to hybrids. *Acta Biomater.* 2013; 9: 4457-86.
8. Hench LL. The story of Bioglass®. *J Mater Sci Mater Med.* 2006; 17: 967-78.
9. Hench LL, Splinter RJ, Allen WC, Greenlee TK. Bonding mechanisms at the interface of ceramic prosthetic materials. *J Biomed Mater Res.* 1971; 5: 117-41.
10. Rizwan M, Hamdi M, Basirun WJ. Bioglass® 45S5-based composites for bone tissue engineering and functional applications. *J Biomed Mater Res A.* 2017 Nov; 105(11): 3197-3223.
11. Rodrigues C, Naasani LIS, Zanatelli C, Paim TC, Azevedo JG, Lima JC, et al. Bioglass 45S5: structural characterization of short range order and analysis of biocompatibility with adipose-derived mesenchymal stromal cells in vitro and in vivo. *Mater Sci Eng C.* 2019; 103: 109781.
12. Fernandes L, Salomao R, Gomes APB, Pontes CS, Trovatti E, Vaz LG, inventores. Hidroxiapatita sintética porosa (HPS) e método de síntese com características físico-químicas que mimetizam a porosidade óssea para uso como enxerto ósseo. Brasil patente BR10202401363. 2024 jul 2.

* 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>

13. Pantulap U, Arango-Ospina M, Boccaccini AR. Bioactive glasses incorporating less-common ions to improve biological and physical properties. *J Mater Sci Mater Med*. 2021;33(1):3.
14. Souza L, Lopes JH, Encarnação D, Mazali IO, Martin RA, Camilli JA, et al. Comprehensive in vitro and in vivo studies of novel melt-derived Nb-substituted 45S5 bioglass reveal its enhanced bioactive properties for bone healing. *Sci Rep*. 2018; 8(1): 12808.
15. Fernandes GVO, Alves GG, Linhares ABR, Prado da Silva MH, Granjeiro JM. Evaluation of cytocompatibility of bioglass-niobium granules with human primary osteoblasts: a multiparametric approach. *Key Eng Mater*. 2012; 493-494: 37-42.
16. Gadallah MA, Darwish RM, Alshimy AM, Gepreel MA, Marei MK. Biomimetic coating of titanium surface using bioactive glass nanoparticles. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2022; 37(1): 86-97.
17. Ministério de Minas e Energia (MME). Brasil é o principal agente no mercado mundial de nióbio [Internet]. 2023 nov 28 [acesso 2026 jan 23]. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticiasem202311/brasil-e-o-principal-agente-no-mercado-mundial-de-niobio>
18. Muraro POC, Denis FA. Aproveitamento da casca de arroz (CA) no município de Bagé-RS. In: *Anais do VI Simpósio da Ciência do Agronegócio*; 2018 out 25-26; Porto Alegre, RS [anais eletrônicos]. Porto Alegre: Cepan/UFRGS; 2018 [acesso 2026 jan 23]. p. 1-10. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/cienagro/wp-content/uploadsem2018/10/Aproveitamento-da-casca-de-arroz-CA-no-municipio-de-Bage-RS.pdf>
19. Hammami I, Gavinho SR, Pádua AS, Lança MC, Borges JP, Silva JC, et al. Extensive investigation on the effect of niobium insertion on the physical and biological properties of 45S5 bioactive glass for dental implant. *Int J Mol Sci*. 2023;24(6):5244.
20. Abbas M, Buntinx M, Deferme W, Reddy N, Peeters R. Oxygen gas and UV barrier properties of nano-ZnO-coated PET and PHBHHx materials fabricated by ultrasonic spray-coating technique. *Nanomaterials (Basel)*. 2021; 11(2): 449.
21. Le Guéhenne L, Soueidan A, Layrolle P, Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dent Mater*. 2007; 23(7): 844-54.
22. Webb K, Hlady V, Tresco PA. Relative importance of surface wettability and charged functional groups on NIH 3T3 fibroblast attachment, spreading, and cytoskeletal organization. *J Biomed Mater Res*. 1998; 41(3): 422-30.
23. Lang NP, Salvi GE, Huynh-Ba G, Ivanovski S, Donos N, Bosshardt DD. Early osseointegration to hydrophilic and hydrophobic implant surfaces in humans. *Clin Oral Implants Res*. 2011; 22(4): 349-56.

24. Gittens RA, McLachlan T, Olivares-Navarrete R, Cai Y, Berner S, Tannenbaum R et al. The effects of combined micron-/submicron-scale surface roughness and nanoscale features on cell proliferation and differentiation. *Biomaterials*. 2011; 32(13): 3395-403.
25. Wu C, Chen M, Zheng T, Yang X. Effect of surface roughness on the initial response of MC3T3-E1 cells cultured on polished titanium alloy. *Biomed Mater Eng*. 2015; 26(Suppl 1): S155-64.
26. Vasak C, Busenlechner D, Schwarze UY, Leitner HF, Munoz Guzon F, Hefti T et al. Early bone apposition to hydrophilic and hydrophobic titanium implant surfaces: a histologic and histomorphometric study in minipigs. *Clin Oral Implants Res*. 2014; 25(12): 1378-85.
27. Santos KH, Ferreira JA, Osiro D, Conceição GJA, Bernardes Filho R, Colnago LA et al. Influence of different chemical treatments on the surface of Al₂O₃/ZrO₂ nanocomposites during biomimetic coating. *Ceram Int*. 2017; 43(5): 4272-9.
28. Stoilov M, Stoilov L, Enkling N, Stark H, Winter J, Marder M et al. Efeitos de diferentes tratamentos de superfície de titânio na adesão, proliferação e diferenciação de células ósseas: um estudo in vitro. *J Funct Biomater*. 2022; 13(3): 143.
29. Faria LV, Lopes MES, Oliveira DP, Silva FS, Fugivara CS, Nogueira AVB et al. Sustained release of Sr and Ca from a micronanotopographic titanium surface improves osteoblast function. *Biometals*. 2025; 38(2): 623-46.
30. Almassri HNS, Ma Y, Dan Z, Ting Z, Cheng Y, Wu X. Implant stability and survival rates of a hydrophilic versus a conventional sandblasted, acid-etched implant surface: systematic review and meta-analysis. *J Am Dent Assoc*. 2020; 151(6): 444-53.
31. Canullo L, Menini M, Guardone L, Merlini V, Cameroni V, Sculean A et al. Do super-hydrophilic surfaces affect implant primary stability in the early healing phase of osseointegration? A systematic review with meta-analysis. *Oral Health Prev Dent*. 2025; 23: 469-78.
32. Kohli N, Stoddart JC, van Arkel RJ. The limit of tolerable micromotion for implant osseointegration: a systematic review. *Sci Rep*. 2021; 11(1): 10797
33. Broitman E. Indentation hardness measurements at macro-, micro-, and nanoscale: a critical overview. *Tribol Lett*. 2017; 65: 23.
34. Gorustovich A, Rosenbusch M, Guglielmotti MB. Characterization of bone around titanium implants and bioactive glass particles: an experimental study in rats. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2002; 17(5): 644-50.
35. Yu C, Zhuang J, Dong L, Cheng K, Weng W. Effect of hierarchical pore structure on ALP expression of MC3T3-E1 cells on bioglass films. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2017; 156: 213-20.

36. Kokubo T, Takadama H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? *Biomaterials*. 2006; 27(15): 2907-15.
37. Wenzel RW. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind Eng Chem*. 1936; 28: 988-94.
38. Liang J, Lu X, Zheng X, Li YR, Geng X, Sun K et al. Modification of titanium orthopedic implants with bioactive glass: a systematic review of in vivo and in vitro applications. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023; 11: 1269223.
39. Avelino SO, Sobral-Silva LA, Thim GP, Almeida-Silva LA, Lupp JS, Campos TMB et al. Development, characterization, and biological study of bioglass coatings 45S5 and BioK on zirconia implant surfaces. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2024; 112(2): e35380.
40. Obata A, Takahashi Y, Miyajima T, Ueda K, Narushima T, Kasuga T. Effects of niobium ions released from calcium phosphate invert glasses containing Nb₂O₅ on osteoblast-like cell functions. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2012; 4(10): 5684-90.
41. Souto MVM. Estudo de métodos de dopagem para obtenção e caracterização de óxido e carbetto de nióbio com cobre e sua aplicação em compósitos sinterizados (CuNbC) [tese]. Natal (RN): Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2017.
42. De Siqueira L, Campos TMB, Camargo SEA, Thim GP, Trichês ES. Structural, crystallization and cytocompatibility evaluation of the 45S5 bioglass-derived glass-ceramic containing niobium. *J Non Cryst Solids*. 2021; 555: 120629.
43. Lopes JH, Magalhães A, Mazali IO, Bertran CA. Effect of niobium oxide on the structure and properties of melt-derived bioactive glasses. *J Am Ceram Soc*. 2014; 97(12): 3843-52.
44. ASTM International. ASTM B600-22: standard guide for descaling and cleaning titanium and titanium alloy surfaces. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2022.
45. Sonzap.com. Ultrasonic generator [homepage na Internet]. [S.l.]: Sonzap; c2026 [acesso em 2026 jan 25]. Disponível em: https://www.sonozap.com/Ultrasonic_Generator.html
46. Sonzap.com. How nozzles work [Internet]. [S.l.]: Sonzap; c2026 [acesso em 2026 jan 25]. Disponível em: https://www.sonozap.com/How_Nozzles_Work.html