

Física

Biovidros e Biovitrocerâmicas: uma revisão sobre suas propriedades

Bioglasses and Bioceramics: a review about their properties

Bernardo Kappaun de Oliveira¹ , Naira Maria Balzaretti¹ , Silvio Buchner¹ 

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

RESUMO

Estudos com biovidros e biovitrocerâmicas vêm ganhando destaque em função do desenvolvimento da medicina moderna. Muitos destes trabalhos têm como foco a melhora de propriedades em condições de uso destes biomateriais. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo reunir informações sobre a função de cada óxido que compõe os distintos biovidros. Foi realizada uma revisão da literatura e foram agrupadas informações das características de determinadas composições de biovidros e biovitrocerâmicas. Diversos artigos foram analisados com o objetivo de comparar o efeito dos elementos in vivo, o índice de bioatividade e suas propriedades mecânicas, como a tenacidade à fratura, provenientes de cada composição.

Palavras-chave: Biovidros; Biovitrocêramicas; Bioatividade; Propriedades

ABSTRACT

Studies with bioglass and bioglass ceramics have been gaining prominence due to the development of modern medicine. Many of these works focus on improving properties under conditions of use of these biomaterials. In this sense, this work aims to gather information about the function of each oxide that composes the different bioglasses. A literature review was carried out and information on the characteristics of certain bioglass and bioceramics compositions was gathered. Several articles were analyzed in order to compare the effect of the elements in vivo, the bioactivity index and their mechanical properties, such as fracture toughness, from each composition.

Keywords: Bioglasses; Bioceramics; Bioactivity; Properties

1 INTRODUÇÃO

Foi descoberto por Hench e colaboradores em 1969 que o osso pode se ligar quimicamente a certas composições de vidro. Este grupo de vidros ficou conhecido como vidros bioativos com base na seguinte definição: *“Um material bioativo é aquele que provoca uma resposta biológica específica na interface do material que resulta na formação de uma ligação entre os tecidos e o material”* (Hench, & Andersson, 1993). O vidro bioativo denominado Bioglass® 45S5 tem sido o vidro amplamente investigado para aplicações biomédicas (Hench, 1998) e sendo ainda considerado como o padrão ouro entre os biovidros. Após o desenvolvimento do Bioglass® 45S5, várias outras composições de vidros de silicato bioativos foram desenvolvidas. Apesar de suas excelentes propriedades bioativas, como boa osteocondutividade e osteoindutividade, as principais desvantagens dos biovidros são sua baixa resistência mecânica e baixa tenacidade à fratura. Por conta disso, cerâmicas de vidro bioativas foram desenvolvidas a fim de melhorar o desempenho mecânico. As mais conhecidas são: Ceravital®, Bioverit® I e A/W Cerabone® (Crovace et al., 2016).

Em meados da década de 1990, tinha-se como um grande desafio o desenvolvimento de um novo material que pudesse combinar a alta bioatividade, observada no Bioglass® 45S5, com boa resistência mecânica e tenacidade à fratura, presente em A/W Cerabone® por exemplo. Uma das estratégias era melhorar diretamente a resistência mecânica do Bioglass® 45S5 por meio de cristalização controlada. Outras pesquisas levaram ao desenvolvimento de uma nova vitrocerâmica denominada Biosilicato® o qual apresenta, entre as propriedades analisadas, resultados iguais ou melhores que o Bioglass® 45S5 (Crovace et al., 2016). Além disso, a adição de determinados elementos na composição dos vidros bioativos se mostra bastante promissora na expectativa de aumentar ou até mesmo acrescentar certas características a esses produtos (Nandi et al., 2016).

É importante ressaltar que o uso de vidros bioativos não se restringe a reparação do tecido ósseo, estudos apontam que materiais com grande índice de bioatividade são capazes de se ligar com o tecido conjuntivo, podendo serem utilizados para substituir partes do sistema cardiovascular, por exemplo (Siqueira, & Zanotto, 2011). Ademais, grande parte das biovitrocerâmicas são utilizadas em tratamentos dentários e ortopédicos por apresentarem maior resistência mecânica (Crovace et al., 2016).

2 MÉTODOS DE FORMAÇÃO DE VIDROS BIOATIVOS

Para a obtenção de biovidros e biovitrocerâmicas, dois métodos são mais utilizadas por pesquisadores: o método de fusão e o método sol-gel. A escolha de formação tem efeito na área superficial, bem como na degradabilidade do material (Nandi et al., 2016; Zhong, & Greenspan, 2000; Sepulveda et al., 2001). De forma geral, a obtenção de vidros bioativos por meio de fusão segue passos semelhantes, sendo feita a mistura dos elementos primários, geralmente óxidos de alta pureza, que compõem o material, a qual é fundida em fornos de alta temperatura. A fusão geralmente é feita na faixa de 1000-1500°C dependendo da composição — cadinhos de platina são usados para evitar contaminação do fundido. Logo após a fusão, o recozimento (*annealing*) é feito em uma faixa de 450-550°C por conta do alto coeficiente de expansão térmica nas composições de vidros bioativos, evitando, assim geração de tensões térmicas no material. Após este procedimento o biovidro pode ser utilizado para as respectivas análises.

Além do método de fusão, pode se produzir os biomateriais pelo método de sol-gel: gelificação de uma solução de pós, secagem hipercrítica ou hidrólise controlada e policondensação de precursores de alcóxido seguidos de envelhecimento e secagem sob atmosferas ambientais. Os sóis são dispersões de partículas coloidais em um líquido. O gel é uma rígida rede interconectada com poros de dimensões submicrométricas. Os géis são classificados em três tipos:

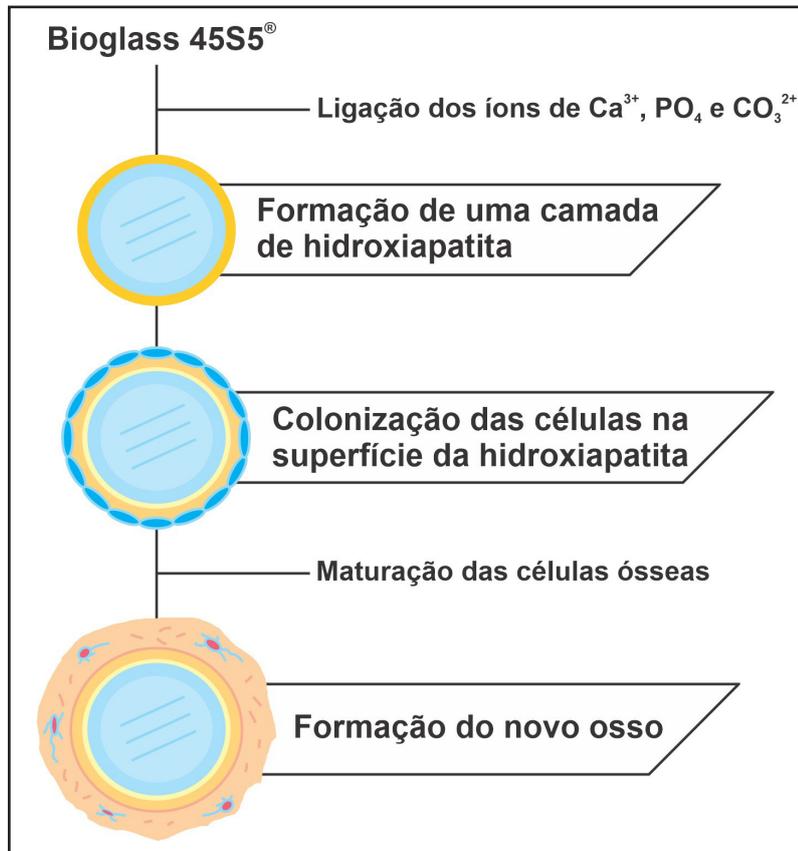
alcogéis – à base de álcool, xerogéis – formados a partir da remoção térmica do líquido dos poros e os aerogéis – resultantes da remoção dos líquidos dos poros, resultando em baixa densidade e grande volume poroso (Nandi et al., 2016; Hench, & West, 1990). O método sol-gel já é amplamente empregado por pesquisadores devido à utilização de baixas temperaturas em seu processo, além disso, é responsável por aumentar a área superficial do material exibindo também maiores taxas de ligação óssea juntamente com excelentes propriedades de degradação/reabsorção (Zhong, & Greenspan, 2000; Arcos, & Vallet-Regí, 2010).

3 BIOGLASS® 45S5

O Bioglass® 45S5 possui a composição de $24,5\text{Na}_2\text{O}-24,5\text{CaO}-45\text{SiO}_2-6\text{P}_2\text{O}_5$ (wt.%), exibindo o maior índice de bioatividade ($I_B = 12,5$) (Crovace et al., 2016). A alta bioatividade do Bioglass® 45S5 é atribuída à presença de pentóxido de fósforo (P_2O_5) (Jayaswal et al., 2010). Quando em contato com os fluidos corporais, os vidros de silicato bioativo sofrem reações que levam à formação de uma camada de hidroxiapatita carbonatada (HCA) em sua superfície (Crovace et al., 2016). Essa formação é aceita como condição necessária para a formação de uma ligação química entre o material e o osso (Hench, & Andersson, 1993) e está diretamente relacionada à osteocondução. Biovidros apresentam maior osteocondutividade do que cerâmicas bioativas, estando isso associado à taxa de formação de HCA na superfície, sendo que quanto maior for a sua taxa de formação, mais rápido o material se ligará ao osso (Crovace et al., 2016; Jones et al., 2007).

A Figura 1 ilustra a reação superficial do Bioglass® 45S5 e o crescimento ósseo a partir de interações entre o material e os tecidos.

Figura 1– Reação superficial do 45S5



Fonte: Adaptado de Prosidvan (2016)

4 BIOVITROCERÂMICAS

O Bioverit® I possui um intervalo de composição de (5,5–9,5)Na₂O–(13–28)CaO–(29,5–50)SiO₂–(8–18)P₂O₅–(0–19,5)Al₂O₃–(6–28)MgO–(5,5–9,5)K₂O–(2,5–7)F (wt.%), sendo formada por cristais de apatita e mica, responsáveis por sua excelente usinabilidade (Höland e Beall, 2019). Ceravital® é composta por (5–10)Na₂O–(30–35)CaO–(40–50)SiO₂–(10–15)P₂O₅–(2,5–5)MgO–(0,5–3)K₂O (wt.%) (Höland, & Beall, 2019; Bromer, 1977). É formada por uma fase vítrea, cristais de devitrita e apatita, aplicada principalmente como substituta da cadeia ossicular no ouvido médio (Crovace et al., 2016). A/W Cerabone® é composta por uma matriz de apatita reforçada por cristais de wollastonita. Possui uma composição de 44,7CaO–34SiO₂–16,2–P₂O₅–0,5CaF₂–4,6MgO

(wt.%) (Höland, & Beall, 2019; Kokubo et al., 1974). Além de outras aplicações, ela tem sido utilizada na substituição da crista íliaca (Crovace et al., 2016).

O processo de cristalização para formação de um vitrocerâmico ocorre em duas etapas: nucleação e crescimento de cristais. A nucleação é um fator decisivo para cristalização controlada, o desenvolvimento de cristais em vidro geralmente ocorre em dois estágios: formação de núcleos submicroscópicos, denominados embriões, e seu crescimento em cristais macroscópicos, podendo ocorrer por diferentes mecanismos, sendo dividido comumente em nucleação homogênea e heterogênea. A nucleação homogênea é um processo que ocorre de forma uniforme em qualquer elemento de volume dado.

Alternativamente, a nucleação que ocorre em locais preferenciais, como interfaces pré-existentes, fases previamente nucleadas e superfícies defeituosas, é denominada nucleação heterogênea. Uma vez que o núcleo atingiu o tamanho crítico, ele pode eventualmente crescer por adições sucessivas de átomos, conduzindo à formação de cristais que crescem com certa velocidade dependendo da fase e da cinética de cristalização (Höland, & Beall, 2019; Fokin et al., 2006).

A cristalização é caracterizada pela diminuição de energia livre ΔG no volume da fase cristalizada. É possível determinar ΔG , para um sistema passível de cristalização, como sendo:

$$\Delta G = \frac{4}{3}r^3\pi\Delta G_v + 4\pi r^2\sigma. \quad (1)$$

em que ΔG_v é a variação volumétrica da energia livre, r o raio e σ a energia livre de superfície. Derivando (1) em relação à r e igualando a zero, chega-se na equação do raio crítico:

$$r^* = \frac{2\sigma}{\Delta G_v}. \quad (2)$$

Quando o núcleo tem raio menor que r^* , ele é considerado embrião e tende a dissolver. Contrariamente, quando o raio é maior que r^* , o núcleo cresce.

Entre as vitrocerâmicas supracitadas, todas são compostas de uma fase cristalina semelhante à apatita, a qual é muito menos solúvel que o Bioglass® 45S5. Dessa forma, elas apresentam nível de bioatividade relativamente baixo (índice de bioatividade I_B entre 5 e 8). Entretanto, por conta da cristalização, as cerâmicas de vidro contêm valores maiores em se tratando de resistência mecânica (Crovace et al., 2016).

5 MEDINDO A BIOATIVIDADE

Como visto, as composições apresentam diferentes valores de índice de bioatividade I_B . O índice de bioatividade de um material pode ser relacionado com o tempo por: $I_B = 100/t_{0,5bb}$ em que $t_{0,5bb}$ é o tempo gasto para que cerca de 50% da superfície esteja ligada às células do tecido ósseo (Siqueira, & Zanotto, 2011). Este potencial de bioatividade pode ser medido através da formação de uma camada de apatita quando o material é posto em contato com líquido acelular, contendo concentração de íons similar ao do plasma sanguíneo. Em 2007, a solução c-SBF (*corrected simulated body fluid*), desenvolvida por Kokubo et al., foi publicado pela *International Organization for Standardization* (ISO) e dada como solução para avaliação da bioatividade de materiais de implante *in vitro* (Kokubo, & Takadama, 2006; Yilmaz et al., 2020; Iso, 2007). Em 2004, Takadama et al. propuseram um SBF melhorado (n-SBF), no qual eles diminuíram a concentração de íons Cl^- (Kokubo, & Takadama, 2006; Takadama et al., 2004). A Tabela 1 apresenta as composições de SBFs em comparação ao plasma sanguíneo.

Tabela 1 – Concentrações de íons de SBF e plasma de sangue humano

Concentração iônica (mM)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	HCO ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ⁻
Plasma (Gamble, 1954)	142,0	5,0	1,5	2,5	103,0	27,0	1,0	0,5
c-SBF	142,0	5,0	1,5	2,5	147,8	4,2	1,0	0,5
n-SBF (Takadama et al., 2004)	142,0	5,0	1,5	2,5	103,0	4,2	1,0	0,5

Fonte: (Kokubo, & Takadama, 2006)

Pode ser visto na Tabela 1 que o c-SBF é mais rico em Cl^- e mais pobre em HCO_3^- , e, portanto, a apatita formada no c-SBF não é a mesma que a apatita óssea em sua

composição e estrutura (Oyane et al., 2003). No entanto, o carbonato de cálcio tem uma forte tendência a precipitar a partir deste SBF, pois é supersaturado em relação não apenas à apatita, mas também à calcita (Kokubo, & Takadama, 2006; Oyane et al., 2003). Além disso, a redução de íons de HCO_3^- resulta em nucleação e crescimento mais rápido da apatita (Yilmaz et al., 2020; Oyane et al., 2003).

Além do mais, mesmo que os testes em SBF apontem alta bioatividade de materiais como o Bioglass® 45S5 e o Biosilicato®, não há como prognosticar o desempenho *in vivo* desses compostos (Bohner, & Lemaître, 2009). Portanto, testes utilizando células são realizados, alguns são epilogados a seguir.

5.1 Citotoxicidade e genotoxicidade

Testes de citotoxicidade são utilizados para avaliar se os componentes dos biomateriais são ou não tóxicos para as células do corpo hospedeiro (Crovace et al., 2016). Utiliza-se geralmente linhagens celulares já estabelecidas, podendo distinguir, geralmente por meio de corantes, células vivas de células danificadas ou mortas, a partir da intensidade de cor da cultura celular — sendo o vermelho neutro um corante vital o qual indica a integridade de lisossomos (e células) enquanto que o método de coloração *amido black* também fornece dados significativos sobre o crescimento celular. Combinando os dois métodos no mesmo ensaio, eles fornecem dois parâmetros distintos de sobrevivência celular no sistema de cultura (Ciapetti et al., 1996). A partir da interação entre tecido e biomaterial é possível analisar se a composição é tóxica, não tóxica, bioativa ou biodegradável. Ademais, os testes de genotoxicidade avaliam se um material pode causar danos aos genes dentro de uma célula e, então, causar mutações, as quais podem resultar em doenças como o câncer. (Crovace et al., 2016).

6 BIOSILICATO®

O Biosilicato® é composto por $23,75\text{Na}_2\text{O}-23,75\text{CaO}-48,5\text{SiO}_2-4\text{P}_2\text{O}_5$ (wt.%) possuindo índice de bioatividade maior que 8 ($I_B > 8$). Percebe-se que o Biosilicato® faz

parte do mesmo sistema que o Bioglass® 45S5, onde é mudado apenas a composição percentual. Essa mudança proporcionou ao Biosilicato® maior nível de resistência à flexão e módulo de Young em comparação ao 45S5, possuindo também razoável usinabilidade por ser relativamente fácil de cortar e furar, permitindo melhor manipulação do material para uso em casos diversos (Crovace et al., 2016).

Em um dos seus primeiros testes clínicos, o Biosilicato® foi utilizado para ocluir os túbulos dentários, reagindo rapidamente com a saliva e o tecido circundante e eliminando com sucesso a causa da hipersensibilidade dentinária (Siqueira, & Zanotto, 2011; Zanotto et al., 2004). Por possuir características especiais, em relação a outros vidros bioativos, atualmente o Biosilicato® é utilizado em testes de diversas áreas de pesquisa, envolvendo desde a manutenção bucal até procedimentos como a ossiculoplastia — em que é utilizado como prótese para reconstrução ossicular em humanos (Siqueira, & Zanotto, 2011).

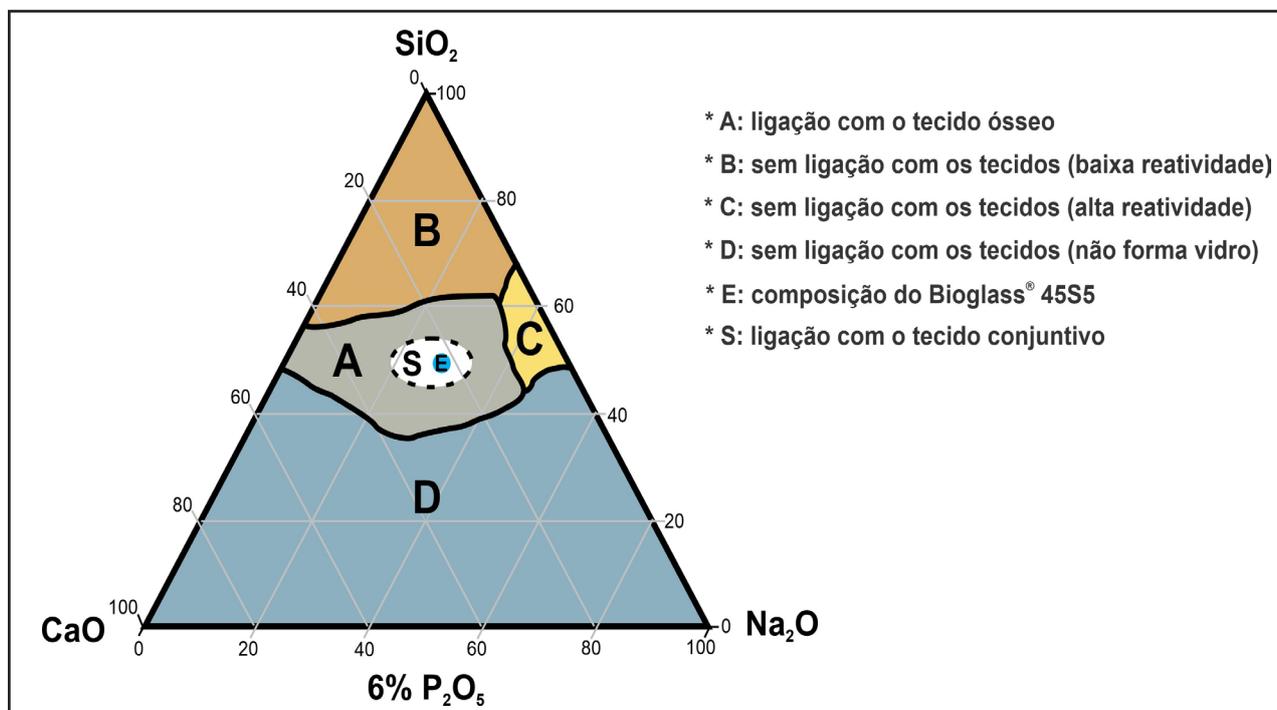
7 RELAÇÃO ENTRE COMPOSIÇÃO E ÍNDICE DE BIOATIVIDADE

Observa-se na literatura que poucas composições apresentam alto índice de bioatividade (Crovace et al., 2016). A relação entre composição e bioatividade de vidros pertencentes ao sistema $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ é mostrada abaixo na Figura 2, na qual se assume concentração constante de $6\%P_2O_5$.

É possível perceber que somente uma pequena área do diagrama apresenta composições com possibilidade de ligação junto ao tecido conjuntivo, sendo essas as que apresentam maior índice de bioatividade. Composições contendo de 52 a 60 % em massa de SiO_2 apresentam taxas de ligação mais lentas com o tecido ósseo, não havendo ligação com os tecidos quando se tem mais de 60% de SiO_2 (Região B) (Siqueira, & Zanotto, 2011). Composições presentes na Região S, como o Bioglass® 45S5, interagem ativamente com os tecidos e induzem seu reparo. Isso envolve controle sobre o ciclo celular e sobre a estrutura molecular que controla a proliferação. Dependendo da taxa de reabsorção e liberação de íons, eles podem criar gradientes

químicos com ações biológicas específicas sobre células e tecidos quando o índice de bioatividade é superior a 8 (Siqueira e Zanotto, 2011; Hench et al., 2000).

Figura 2 – Diagrama ternário SiO_2 -CaO- Na_2O



Fonte: Adaptado de (Hench, 1998; Siqueira, & Zanotto, 2011)

8 FASES FORMADAS NA CRISTALIZAÇÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS

A tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas dos materiais bioativos discutidos além da estrutura de cada um deles.

Entre os analisados, o Biosilicato® destaca-se por apresentar uma fase cristalina não fosfática solúvel, o que é um dos contribuintes para a rápida formação de uma camada de hidroxiapatita (HCA) (Crovace et al., 2016).

Tabela 2 – Índice de bioatividade e propriedades mecânicas de materiais bioativos (Crovace et al., 2016; Höland, & Beall, 2019)

Biomaterial	Índice de bioatividade I_B	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Estrutura
Bioglass® 45S5	12,5	40	60	Vidro
A/W Cerabone®	6	215	120	(1) + β -wollastonita + apatita + vidro
Ceravital®	5,6	100-150	100-160	(1) + devitrita + apatita + vidro
Bioverit® I	$I_B < 8$	140-180	70-90	(1) + mica + apatita + vidro
Biosilicato®	$I_B > 8$	120-210	70-80	1N2C3S

Fonte: (Crovace et al., 2016; Höland, & Beall, 2019)

9 DOPAGEM COM ÍONS METÁLICOS

Como já visto, os vidros bioativos são relatados como sendo capazes de melhor regeneração óssea do que outras cerâmicas bioativas disponíveis, no entanto, para determinadas aplicações, algumas propriedades precisam ser otimizadas, como é o caso de propriedades mecânicas para utilizações envolvendo tecido ósseo. Foi descoberto nas últimas duas décadas por pesquisadores que os biomateriais são capazes de se ligar a certos elementos, sendo que esses contribuem com a adição de novas características além de poder proporcionar melhorias em outras. Além disso, diferentes partes do corpo humano, passíveis de aplicação de biovidros, necessitam de diferentes propriedades físicas e químicas, requerendo, portanto, vidros bioativos com composições diferentes ou modificadas (Nandi et al., 2016). Sendo que a adição de alguns íons inorgânicos em materiais bioativos pode auxiliar na melhoria de algumas propriedades.

A tabela 3 sintetiza os efeitos de alguns íons inorgânicos no corpo humano, os quais podem ser utilizados como dopantes em composições de vidros bioativos.

Tabela 3 – Efeitos de diferentes íons inorgânicos no corpo humano

Íon	Atividade biológica
	- Formação de tecido ósseo
Si	- A suplementação de Si aumenta a densidade mineral óssea - Ajuda a estimular a formação de colágeno I e a diferenciação osteoblástica
Ca	- Favorece a proliferação, diferenciação e mineralização de osteoblastos - Ativa os receptores de detecção de Ca em células de osteoblastos
P	- Estimulação da proteína Matrix Gla (MGP)
	- Mostra efeito anti-inflamatório
Zn	- Formação óssea in vitro pela ativação da síntese de proteínas em osteoblastos - Aumenta a atividade de ATP
	- Ajuda a formar novos ossos
Mg	- Aumenta a adesão e estabilidade das células ósseas
	- Efeitos benéficos na formação óssea <i>in vivo</i>
Sr	- Ajuda no tratamento da osteoporose
	- Promove efeitos estimulantes sinérgicos na angiogênese
Cu	- Estimula a proliferação de células endoteliais humanas
	- Estimula a síntese de RNA em células de fibroblastos
B	- Estimula a formação óssea
	- Tratamento de transtorno depressivo, bipolar e unipolar
Li	- Efeitos no sangue e no cérebro - Aumenta as atividades imunológicas de monócitos e linfócitos

Fonte: (Nandi et al., 2016)

9.1 Dopagem com zinco

Balamurugan et al. (2007) formaram um vidro bioativo de composição $64\text{SiO}_2-26\text{CaO}-5\text{P}_2\text{O}_5-5\text{ZnO}$ (% em mol). Foi examinado que a incorporação de Zn no biovidro não diminui sua bioatividade, sendo essa adição benéfica para o aumento da fosfatase alcalina, auxiliando também na proliferação de osteoblastos. O zinco tem a capacidade de remover cátions da rede de sílica e a nova ligação formada (Si-O-Zn) tem força de ligação consideravelmente menor do que a ligação Si-O-Si, o que leva ao declínio da temperatura de transição vítrea (Nandi et al., 2016). Descobriu-se também que a presença de zinco impede a cristalização das hidroxiapatitas (de Lima, 2006).

9.2 Dopagem com estrôncio

Há evidências crescentes de que biomateriais contendo Sr têm efeitos positivos no reparo do tecido ósseo. Em um dos estudos, divulgado por Amudha et al. (2020), o 45S5 foi dopado com estrôncio (<0,5% em peso) e sintetizado pela técnica sol-gel. Após análises físico-químicas bem como testes *in vitro*, inferiu-se que com essa composição, o biovidro mostrou um aumento na cristalinidade em comparação com outras amostras primárias, além disso notou-se grande resistência à compressão e aumento da área superficial. Lao et al. (2008) prepararam vidros dopados com Sr de composição SiO_2 (75% em peso)– CaO (25-X% em peso)– SrO (X% em peso) sintetizados pelo método sol-gel. Após testes, em comparação com o biovidro sem dopagem, os vidros bioativos dopados apresentaram aumento de bioatividade no material *in vitro*. Por fim, sabe-se também que o estrôncio afeta positivamente o metabolismo ósseo, tendendo a aumentar a atividade metabólica dos osteoblastos e a diminuir a atividade dos osteoclastos (Meunier et al., 2004).

9.3 Dopagem com lítio

Khorami et al. (2011) doparam o o biovidro 45S5 com diferentes concentrações de lítio (0-12% em peso), estudando, após, o efeito desse componente no material. Os vidros, compostos por concentrações de LiO_2 no lugar de Na_2O foram fundidos e testados *in vitro* e por técnicas de análise. Os experimentos confirmaram que a formação da apatita carbonatada no vidro modificado com Li depende da dose. Também, inferiu-se que a reatividade da superfície do vidro, falhada completamente em doses mais baixas (0-3% em peso), é recuperada em doses mais altas. Estudos celulares confirmam melhor taxa de proliferação e atividade de fosfatase alcalina dos osteoblastos em vidros com altas concentrações de lítio. Assim como outros íons, o lítio tem a capacidade de aumentar as respostas celulares do tecido ósseo, podendo melhorar a velocidade do processo de estabilização óssea.

9.4 Dopagem com magnésio

Watts et al. (2010) sintetizaram cinco biovidros de composição $26,4\text{Na}_2\text{O}-23(1-x)\text{CaO}-49,5\text{SiO}_2-1,1\text{P}_2\text{O}_5-x\text{MgO}$ (% em mol). De forma convencional, acredita-se que o óxido de magnésio se comporte como o óxido de cálcio, agindo como um modificador de rede. As composições dos biovidros variaram de 0 a 23,08 mol% de MgO. As misturas foram sintetizadas pelo método de fusão. Após testes, foram fornecidas evidências de que o MgO atua mais como um óxido intermediário do que como um modificador de rede. Weiss et al. (2014) estudaram o biovidro de composição $25\text{Na}_2\text{O}-30\text{CaO}-40\text{P}_2\text{O}_5-5\text{SrO}$ (% em mol) utilizando Mg e Ti como dopantes. Para cada um dos dopantes foi formado uma mistura substituindo Na_2O por 5%mol de Mg e Ti. Os vidros foram formados pelo processo de fusão e após testes, o biovidro dopado com Mg apresentou maior rigidez além de uma camada mais espessa de hidroxiapatita em comparação ao biovidro sem dopantes, o que é explicado pela formação de (Mg - OH) que aumenta sua bioatividade.

9.5 Dopagem com prata

Devido as propriedades antimicrobianas da prata, o foco recente no desenvolvimento de implantes dopados com Ag está aumentando (Nandi et al., 2016). A incorporação da prata não tem efeito significativo sobre a bioatividade do vidro (Bellantone et al., 2000). Como a prata é monovalente em comparação com o íon de cálcio bivalente, são necessários dois íons de Ag para formar dois grupos de oxigênio no lugar de um íon de cálcio, diminuindo a dissolução do vidro (El-Kady, & Ali, 2012).

10 BIOVIDROS PARA A PELE

Como já visto, pesquisadores vêm em busca de materiais bioativos que possam combinar alta bioatividade com alta usinabilidade. O vidro bioativo denominado F18 desenvolvido por Souza (2011) possui características necessárias para ser utilizado

na forma de pó, fibras, ou *scaffolds*. Além disso, possui rápida interação com fluidos corpóreos, acelerando o processo de regeneração, bem como baixa tendência de cristalização durante seu processamento em fibras. Esse biovidro, pertence ao sistema $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O-MgO-CaO-P}_2\text{O}_5$, mostra-se inovador por poder ser utilizado no formato de fibras, as quais formam uma manta fina e flexível. O F18 mostra-se extremamente útil para a cicatrização de feridas e infecções tanto em tecidos moles quanto em tecidos duros. Campanini (2015) avaliou a atividade bactericida do biovidro F18 e F18 dopado com prata. Nos dois casos, o biovidro apresentou eficiente atividade bactericida, sendo o biovidro dopado com prata ainda mais absoluto.

11 CONCLUSÕES

Esta revisão buscou organizar informações sobre biovidros e biovitrocerâmicas, bem como a função de cada elemento que constitui o biomaterial. Entre os materiais estudados, o Biosilicato® apresenta índice de bioatividade considerável, sendo capaz de se ligar com tecidos conjuntivos, além disso, em comparação com o padrão ouro Bioglass® 45S5, ele apresenta melhores propriedades mecânicas, mostrando grande utilidade para a medicina de regeneração óssea. Ademais, as dopagens com íons metálicos apresentam alternativas viáveis na adição ou modificação de características dos biomateriais, sendo necessário estudos específicos a fim de sugerir e testar novas composições visando a otimização de suas propriedades.

REFERÊNCIAS

- Amudha, S., Ramya, J. R., Arul, K. T., Deepika, A., Sathiamurthi, P., Mohana, B., Asokan, K., Dong, C. L., Kalkura, S. N. (2020). Enhanced mechanical and biocompatible properties of strontium ions doped mesoporous bioactive glass. *Composites Part B: Engineering*, 196, 108,099, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836819335048>.
- Arcos, D., Vallet-Regí, M. (2010). Sol-gel silica-based biomaterials and bone tissue regeneration. *Acta Biomaterialia*, 6(8), 2874–2888, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706110000735>.

- Balamurugan, A., Balossier, G., Kannan, S., Michel, J., Rebelo, A. H., Ferreira, J. M. (2007). Development and in vitro characterization of sol-gel derived CaO-P₂O₅-SiO₂-ZnO bioglass. *Acta Biomaterialia*, 3(2), 255-262, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706106001255>.
- Bellantone, M., Coleman, N., Hench, L. (2000). Bacteriostatic Action of a Novel Four-Component Bioactive Glass. *Journal of biomedical materials research*, 51, 484-90.
- Bohner, M., Lemaître, J. (2009). Can bioactivity be tested in vitro with SBF solution? *Biomaterials*, 30(12), 2175-2179, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961209000167>.
- Bromer, H. (1977). Properties of the bioactive implant material 'Ceravital'. Em: *Science of Ceramics*, 9, Proc. 9th Int. Conf. held Noordwijkerhout, The Netherlands, Nov. 13-16, 1977. Edited by K. J. de Vries. Rijswijk, Netherlands Keramische Vereniging, 1977., p 219.
- Campanini, L. A. (2015). Avaliação da atividade bactericida do biovidro F18 e F18 com prata para aplicações médicas. , URL <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/7319>.
- Ciapetti, G., Granchi, D., Verri, E., Savarino, L., Cavedagna, D., Pizzoferrato, A. (1996). Application of a combination of neutral red and amido black staining for rapid, reliable cytotoxicity testing of biomaterials. *Biomaterials*, 17(13), 1259-1264.
- Crovace, M. C., Souza, M. T., Chinaglia, C. R., Peitl, O., Zanotto, E. D. (2016). Biosilicate® — A multipurpose, highly bioactive glass-ceramic. In vitro, in vivo and clinical trials. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 432, 90-110, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309315001271>.
- El-Kady, A. M., Ali, A. F. (2012). Fabrication and characterization of ZnO modified bioactive glass nanoparticles. *Ceramics International*, 38(2), 1195-1204, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884211007607>.
- Fokin, V. M., Zanotto, E. D., Yuritsyn, N. S., Schmelzer, J. W. (2006). Homogeneous crystal nucleation in silicate glasses: A 40 years perspective. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(26), 2681-2714, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309306005205>.
- Gamble, J. L. (1954). *Chemical anatomy, physiology and pathology of extracellular fluid: a lecture syllabus*. Harvard University Press.
- Hench, L. L. (1998). Bioceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(7), 1705-1728, URL <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02540.x>.
- Hench, L. L., Andersson, O. (1993). BIOACTIVE GLASSES. Em: *An Introduction to Bioceramics*, WORLD SCIENTIFIC, pp. 41-62, URL http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789814317351_0003.
- Hench, L. L., West, J. K. (1990). The sol-gel process. *Chemical Reviews*, 90(1), 33-72, URL <https://doi.org/10.1021/cr00099a003>, publisher: American Chemical Society.

- Hench, L. L., Polak, J. M., Xynos, I. D., Buttery, L. D. K. (2000). Bioactive materials to control cell cycle. *Material Research Innovations*, 3(6), 313–323, URL <https://doi.org/10.1007/s100190000055>.
- Höland, W., Beall, G. (2019). *Glass-Ceramic Technology*, 3^o edn. Wiley, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119423737>.
- ISO 23317: 2007, Implants for Surgery in vitro Evaluation for Apatite-Forming Ability of Implant Materials.
- Jayaswal, G. P., Dange, S. P., Khalikar, A. N. (2010). Bioceramic in dental implants: A review. *The Journal of the Indian Prosthodontic Society*, 10(1), 8–12, URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3453171/>.
- Jones, J. R., Gentleman, E., Polak, J. (2007). Bioactive Glass Scaffolds for Bone Regeneration. *Elements*, 3(6), 393–399, URL <https://pubs.geoscienceworld.org/elements/article/3/6/393-399/137752>.
- Khorami, M., Hesarak, S., Behnamghader, A., Nazarian, H., Shahrabi, S. (2011). In vitro bioactivity and biocompatibility of lithium substituted 45s5 bioglass. *Materials Science and Engineering: C*, 31(7), 1584–1592, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493111001937>.
- Kokubo, T., Takadama, H. (2006). How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? *Biomaterials*, 27(15), 2907–2915, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961206000457>.
- Kokubo, T., Ito, S., Tashiro, M. (1974). Formation of Metastable Pyrochlore-Type Crystals in Glasses. *Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University*, 51(5), 315–328, URL <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/76500>.
- Lao, J., Jallot, E., Nedelec, J. M. (2008). Strontium-Delivering Glasses with Enhanced Bioactivity: A New Biomaterial for Antios-teoporotic Applications? *Chemistry of Materials*, 20(15), 4969–4973, URL <https://doi.org/10.1021/cm800993s>.
- de Lima, I. R. (2006). Efeito do zinco na biocompatibilidade in vitro e in vivo de grânulos zinco-apatita 5% em comparação com a hidroxiapatita.
- Meunier, P. J., Roux, C., Seeman, E., Ortolani, S., Badurski, J. E., Spector, T. D., Cannata, J., Balogh, A., Lemmel, E. M., Pors-Nielsen, S., Rizzoli, R., Genant, H. K., Reginster, J. Y. (2004). The effects of strontium ranelate on the risk of vertebral fracture in women with postmenopausal osteoporosis. *The New England Journal of Medicine*, 350(5), 459–468.
- Nandi, S., Mahato, A., Kundu, B., Mukherjee, P. (2016). *Doped Bioactive Glass Materials in Bone Regeneration*.

- Oyane, A., Onuma, K., Ito, A., Kim, H. M., Kokubo, T., Nakamura, T. (2003). Formation and growth of clusters in conventional and new kinds of simulated body fluids. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 64A(2), 339–348, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jbm.a.10426>.
- Prosidvan (2016). Bioactive glass surface reaction. URL https://ryortho.com/wp-content/uploads/2014/10/BioGlass_BioactiveGlassSurfaceReaction_WEB.jpg, acesso em: 31.03.2022.
- Sepulveda, P., Jones, J. R., Hench, L. L. (2001). Characterization of melt-derived 45S5 and sol-gel-derived 58S bioactive glasses. *Journal of Biomedical Materials Research*, 58(6), 734–740, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jbm.10026>.
- Siqueira, R. L., Zanotto, E. D. (2011). Biosilicato®: histórico de uma vitrocerâmica brasileira de elevada bioatividade. *Química Nova*, 34(7), 1231–1241, URL http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422011000700023&lng=pt&nrm=iso&tlng=en.
- Souza, M. T. (2011). Desenvolvimento de manta flexível altamente bioativa. URL <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/839>.
- Takadama, H., Hashimoto, M., Mizuno, M., Kokubo, T. (2004). ROUND-ROBIN TEST OF SBF FOR IN VITRO MEASUREMENT OF APATITE-FORMING ABILITY OF SYNTHETIC MATERIALS. *Phosphorus Research Bulletin*, 17, 119–125.
- Watts, S., Hill, R., O'Donnell, M., Law, R. (2010). Influence of magnesia on the structure and properties of bioactive glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(9), 517–524, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309309007704>.
- Weiss, D., Torres, R., Buchner, S., Blunk, S., Soares, P. (2014). Effect of Ti and Mg dopants on the mechanical properties, solubility, and bioactivity in vitro of a Sr-containing phosphate based glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 386, 34–38, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309313006200>.
- Yilmaz, B., Pazarceveren, A. E., Tezcaner, A., Evis, Z. (2020). Historical development of simulated body fluids used in biomedical applications: A review. *Microchemical Journal*, 155, 104,713, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X19330693>.
- Zanotto, E. D., Ravagnani, C., Filho, O. P., Panzeri, H., LARA, E. H. G. (2004). Procédé et compositions permettant de préparer des biosilicates particuliers, bioactifs ou resorbables utilisés dans le traitement d'affections orales. URL <https://patents.google.com/patent/WO2004074199A1/fr>.
- Zhong, J., Greenspan, D. C. (2000). Processing and properties of sol-gel bioactive glasses. *Journal of Biomedical Materials Research*, 53(6), 694–701, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1097-4636%282000%202953%3A6%3C694%3A%3AAID-JBM12%3E3.0.CO%3B2-6>.

Contribuições de Autoria

1 – Bernardo Kappaun de Oliveira

Graduação em andamento em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<https://orcid.org/0000-0002-8954-8480> • bernardokappaunoliveira@gmail.com

Contribuição: Investigação; Metodologia; Visualização; Escrita – primeira redação; Escrita – revisão e edição

2 – Naira Maria Balzaretto

Doutora em física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<https://orcid.org/0000-0003-2797-8618> • naira@if.ufrgs.br

Contribuição: Análise Formal, Administração do projeto, Escrita – revisão e edição

3 – Silvio Buchner

Doutor em física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<https://orcid.org/0000-0001-7939-5938> • silvio.buchner@ufrgs.br

Contribuição: Conceituação; Análise Formal; Metodologia; Supervisão; Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

Oliveira, B. K. de, Balzaretto, N. M., & Buchner, S. (2023). Biovidros e Biovitrocerâmicas: Uma revisão sobre suas propriedades. *Ciência e Natura*, Santa Maria, 45, e28. DOI 10.5902/2179460X71468. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X71468>