

Argila bentonita: uma breve revisão das propriedades e aplicações

Bentonite clay: a brief review of properties and applications

Arcilla bentonita: una breve revisión de las propiedades y aplicaciones

Recebido: 04/01/2023 | Revisado: 17/01/2023 | Aceitado: 18/01/2023 | Publicado: 21/01/2023

Elaine Ferreira dos Santos Fernandes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7401-9204>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

E-mail: elainefermanddes50@ufpi.edu.br

Eliana Silva Aguiar

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4193-7054>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

E-mail: eliana.aguiar@ufpi.edu.br

Érica Karine Alves de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1405-1960>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

E-mail: ericakarinelima@gmail.com

Ketelly Estefane da Silva Alves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3271-4759>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

E-mail: Ketelly.estefane@ufpi.edu.br

José Rosa de Souza Farias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2747-6749>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

E-mail: joseng2020@ufpi.edu.br

Ycaro Breno Alves de Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3495-3240>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

E-mail: ycarobreno26@gmail.com

Maria Elayne Rodrigues Alves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2910-0131>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

E-mail: maria.elayne@ufpi.edu.br

Hitalo de Jesus Bezerra da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6008-3600>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: hitalo.silva@ufpe.br

Aluska do Nascimento Simões Braga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7764-6147>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Brasil

E-mail: aluskasimoes@hotmail.com

Valdeci Bosco dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2386-5424>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Brasil

E-mail: valdecisantos@ufpi.edu.br

Resumo

As bentonitas são materiais argilosos compostos principalmente por montmorilonita (mineral do grupo das esmectitas). A sua composição coloidal característica determina a incorporação de água, formando pastas plásticas. Sejam sódicas ou cálcicas, as bentonitas são amplamente utilizadas em inúmeras aplicações industriais devido as suas características estruturais, disponibilidade e abundância na natureza, e baixo custo. O presente trabalho teve como objetivo realizar uma breve revisão narrativa da literatura sobre a potencialidade das argilas bentoníticas quanto às suas características e algumas aplicações. Foram selecionados artigos entre os anos de 2017 a 2022 a partir da plataforma *Science Direct* e utilizando as seguintes palavras-chave: *Bentonite, environmental remediation, cosmetics and pharmaceuticals, biomedicine, and civil construction*. Os resultados evidenciaram que a área de aplicação mais estudada foi a de remediação ambiental conectada às investigações em adsorção, o que demonstra o alto interesse e motivação dos pesquisadores por temas relacionados à sustentabilidade. Portanto, espera-se que esta leitura preliminar possa contribuir para a compreensão do potencial tecnológico da bentonita, trazendo clareza ao estudo de suas propriedades e aplicações.

Palavras-chave: Bentonita; Propriedades; Aplicações.

Abstract

Bentonites are clayey materials composed mainly of montmorillonite (a mineral from the smectite group). Their characteristic colloidal composition determines the incorporation of water, forming plastic pastes. Whether sodium or calcium, the bentonites are widely used in numerous industrial applications due to their structural characteristics, availability and abundance in nature, and low cost. The present work aimed to carry out a brief narrative literature review on the potential of bentonite clays regarding their characteristics and some applications. Articles were selected between the years 2017 to 2022 from the Science Direct platform and using the following keywords: bentonite, environmental remediation, cosmetics and pharmaceuticals, biomedicine, and civil construction. The results showed that the most studied area of application was that of environmental remediation connected to investigations in adsorption, which demonstrates the high interest and motivation of researchers in themes related to sustainability. Therefore, it is expected that this preliminary reading can contribute to the understanding of the technological potential of bentonite, bringing clarity to the study of its properties and applications.

Keywords: Bentonite; Properties; Applications.

Resumen

Las bentonitas son materiales arcillosos compuestos principalmente por montmorillonita (mineral del grupo de las esmectitas). Su composición coloidal característica determina la incorporación de agua formando pastas plásticas. Tanto las bentonitas sódicas como cálcicas son ampliamente usadas en distintas aplicaciones industriales, debido a sus características estructurales, disponibilidad y abundancia en la naturaleza y bajo coste. El presente trabajo tuvo como objetivo realizar una breve revisión narrativa de la literatura sobre el potencial de las arcillas bentoníticas en cuanto a sus características y algunas aplicaciones. Fueron seleccionados artículos entre los años 2017 y 2022 a partir de la plataforma *Science Direct* y utilizando las siguientes palabras clave: *Bentonite, environmental remediation, cosmetics and pharmaceuticals, biomedicine y civil construction*. Los resultados evidenciaron que el área de aplicación más estudiada fue la de remediación ambiental unida a las investigaciones en adsorción, lo que demuestra un alto interés y motivación de los investigadores por temas relacionados con la sostenibilidad. Por tanto, se espera que esta lectura preliminar pueda contribuir a la comprensión del potencial tecnológico de la bentonita, aportando luz al estudio de sus propiedades y aplicaciones.

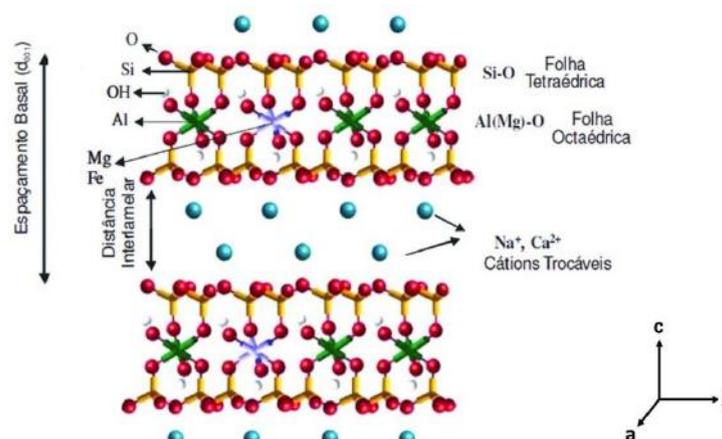
Palabras clave: Bentonita; Propiedades; Aplicaciones.

1. Introdução

É bem conhecido que as argilas possuem um campo industrial plenamente estabelecido devido a vantagens como, por exemplo, serem abundantes, de baixo custo e de uso ambientalmente amigável. Neste contexto, pode-se destacar as bentonitas, que são rochas encontradas em depósito Ordoviciano, mas que geralmente sucedem de depósitos cretáceos e terciários (Santos, 1989). A sua denominação deu-se em decorrência do seu primeiro registro em *Fort Benton*, Montana (Barbieri *et al.*, 2022).

As bentonitas compreendem o conjunto de argilas formadas por argilominerais do grupo da Esmectita, a qual, em sua pluralidade, contém a espécie mineralógica do argilomineral Montmorillonita com fórmula química igual a $(yM^+)(Al_{2-y}Mg_y)Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$ (Murray, 2000). Sua estrutura cristalina é composta por duas folhas de tetraedro de sílica e oxigênio e uma folha do octaedro de hidróxido de alumínio, também chamada de gibsita, configurando (eixo c) a formação da camada 2:1 (Baltar *et al.*, 2010), conforme mostrado na Figura 1.

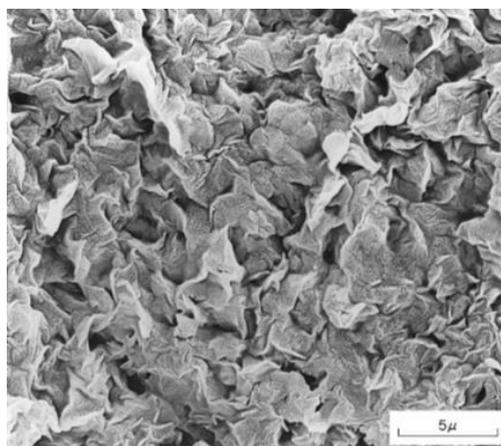
Figura 1 - Estrutura cristalina da Bentonita.



Fonte: Garnica *et al.* (2018).

Observa-se que a junção das folhas só ocorre devido à folha tetraédrica de sílica e oxigênio possuir oxigênio apical com carga residual (Si₂O₅)²⁻, a qual permite que, embora a folha de gibsita seja eletricamente neutra, consiga unir-se com as outras duas folhas de tetraedro de sílica e oxigênio (Santos, 1989). Dessa forma, o crescimento de ambas as folhas ocorre continuamente e ordenadas hexagonalmente em relação aos planos cristalográficos a e b. Em geral, possuem partículas extremamente finas (<<1μm) (Murray, 2000), como mostrado na Figura 2. Estes tamanhos de partículas finas dão a montmorillonita de sódio uma grande área superficial quando a mesma é dispersa em água, o que vem a resultar em elevados valores de viscosidade e tixotropia (Murray, 2000).

Figura 2 - Micrografia da Bentonita (montmorillonita sódica).



Fonte: Murray (2000).

Em razão de cargas elétricas negativas presentes durante a formação da estrutura cristalina das argilas, é que o fenômeno do isomorfismo ocorre. Desta forma, o processo de substituição parcial de cargas de íons que possuem alta valência por um íon correspondente inferior, ocorre sem sofrer modificação na estrutura cristalina. Na folha tetraédrica de sílica e oxigênio, normalmente substitui-se o Si⁴⁺ por Al³⁺. Já na folha de gibsita, o mais comum é sair Al³⁺ e entrar Mg²⁺ ou Fe²⁺ (Baltar *et al.*, 2010). Outra ocorrência que também produz o desbalanceamento para o excesso de cargas negativas é a quebra de ligações químicas entre os elementos nas arestas do argilomineral. Por possuir ambos mecanismos de geração de cargas elétricas negativas, a configuração da bentonita necessita da fixação ou troca de cátions na superfície das suas partículas e região

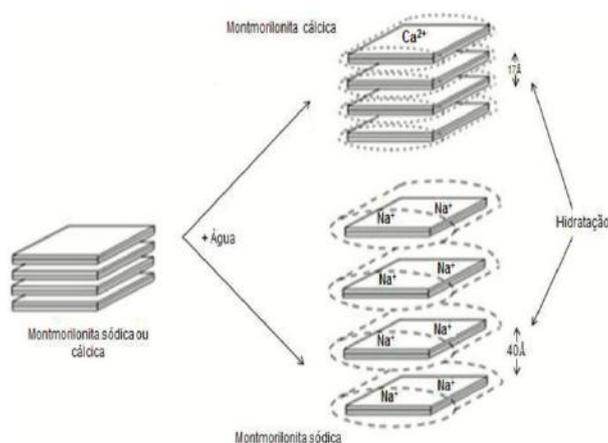
interlamelar, para que esteja eletricamente neutra, processo denominado de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) (Luckham & Rossi, 1999).

A capacidade de troca catiônica da bentonita pertence ao intervalo de 80 a 150 meq/100g, CTC geralmente superior à dos demais argilominerais, que não ultrapassam 40 meq/100g (Santos, 1989). Desta forma, pode adsorver íons orgânicos e inorgânicos. Quando inorgânicos, Na^+ e Ca^{2+} hidratáveis, são exemplos de cátions mais frequentes e que não estão fixados irreversivelmente na estrutura do argilomineral. Entretanto, outros que podem ocorrer com menor regularidade são o caso do H^+ , K^+ e Mg^{2+} (Baltar *et al.*, 2010; Santos, 1989).

Na configuração dos argilominerais existe a distância interplanar basal e a região lamelar, as quais representam tamanhos diferentes (Figura 1). A distância interplanar basal (d_{001} – eixo c) compreende as camadas de folhas tetraédricas de sílica e oxigênio, folha de gibsita e a região interlamelar. Esta última se refere ao espaçamento de uma camada estrutural para outra, onde se localiza os cátions trocáveis (Luckham & Rossi, 1999). A fraca ligação química entre as camadas estruturais e o alto grau de substituição isomórfica facilitam o processo de clivagem em meio líquido das partículas das esmectitas. Logo, d_{001} pode variar entre 10 Å (bentonita na forma “anidra”) - 40 Å (bentonita totalmente dispersa em meio líquido) (Santos, 1989).

Para as bentonitas, a região lamelar é importante, pois, a depender dos cátions localizados nessa região, haverá ou não a expansão (inchamento) na estrutura cristalina (Luckham & Rossi, 1999). Assim, essa condição determinará se a bentonita será sódica ou cálcica, e a diferença no poder de hidratação entre as mesmas é mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Hidratação da Bentonita.



Fonte: Brito (2019).

Conforme a Figura 3, quando sódica, a bentonita poderá expandir várias vezes o seu volume ao entrar em contato com a água, ou seja, ocorrerá um inchamento que proporciona aumento no grau de separação das lamelas, podendo até chegar a delaminação ou esfoliação completa, quando atinge $d_{001} > 40\text{Å}$. O cátion Na^+ provoca uma menor força de atração entre as camadas do argilomineral, separando-as umas das outras. Isto permite que várias moléculas de água sejam adsorvidas, ou seja, uma maior quantidade de água penetre entre as camadas. Já no caso das bentonitas cálcicas, a expansão entre as lamelas não ocorre, e, por isso, a sua distância interplanar basal não varia (Barbieri *et al.*, 2022; Santos, 1989). A presença do cátion Ca^{2+} na esmectita, promove forte atração entre as camadas, reduzindo a quantidade de água a ser adsorvida.

Esta diferença de comportamento quando as bentonitas sódica e cálcica estão em meio aquoso também pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Bentonita seca e em meio aquoso.



Fonte: Amorim *et al.* (2006).

Assim sendo, percebe-se que a bentonita sódica, após agitação e repouso, apresenta-se em um sistema homogêneo, no qual todas suas partículas estão dispersas no meio líquido. Ao contrário, para a bentonita cálcica, as partículas apresentam-se floculadas, ou seja, observa-se nitidamente uma camada da bentonita depositada no fundo do recipiente e sobre essa uma camada de água (Amorim *et al.*, 2006)

Dessa forma, conhecer a bentonita a qual será usada nas diversas possíveis aplicações é importante, pois ser expansiva ou não, impactará nas propriedades físicas apresentadas por cada tipo de bentonita, como exibido na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas da Bentonita cálcica e sódica.

Bentonita	Densidade (Kg/m ³)	Limite de liquidez (LL) (%)	Limite de plasticidade (LP) (%)	Índice de plasticidade (IP) (%)	Índice de inchaço (mL/2g)
Cálcica	1125	244	100	144	17
Sódica	1048	505	80	425	29

Fonte: Barbieri *et al.* (2022).

A coloração da bentonita é bastante variável, geralmente alcançando as cores de bege-marrom, verde-amarelado ou verde-azulado/acinzentado e branco. A bentonita sódica, uma vez apresentando cor verde-amarelado, tem seu uso restrito, ou seja, inviável para muitas aplicações potenciais (Karakaya *et al.*, 2011). Por outro lado, as bentonitas sódicas/cálcicas claras ou brancas são muito raras em ocorrência e preferidas para uso em muitas aplicações específicas (produção do papel, cerâmica, clarificação de vinho/sucos de frutas, e outras) que desejam uma cor branca (Karakaya *et al.*, 2011; Murray, 2007).

Até o presente momento, no Brasil, há ocorrências de jazidas de bentonitas apenas na forma cálcica. Contudo, quando submetida a uma ativação de carbonato de sódio (barrilha) pode ocorrer o aumento do seu desempenho, transformando-a de uma bentonita cálcica para sódica (ANM, 2018; Coelho & Cabral Junior, 2010).

Em relação à produção mundial da bentonita, os Estados Unidos destacam-se como um dos grandes produtores. Estes dados, em milhões de toneladas (t), são disponibilizados pelos relatórios da *United States Geological Survey* (USGS) entre 2016 a 2021 tanto para os Estados Unidos quanto para os demais países (ver Tabela 2), ainda que as reservas mundiais da bentonita possuem complexa mensuração por serem muito abundantes (ANM, 2018).

Tabela 2 - Produção mundial da Bentonita.

Discriminação	Produção (10 ³ t)					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Estados Unidos	3.600	4.300	4.670	4.490	4.240	4.300
Brasil	405	405	520	610	217	200
China	5.600	5.600	5.600	2.000	2.500	2.500
Chéquia	369	369	277	357	226	230
Alemanha	395	395	395	395	360	350
Grécia	808	1.100	1.360	1.300	1.300	1.300
Índia	802	800	800	1.700	3.500	3.500
Irã	436	436	360	360	425	420
México	470	470	470	250	25	20
Senegal	-	-	-	-	-	-
Espanha	113	113	175	160	221	220
Turquia	3.135	3.140	1500	1.300	1.500	1.700
Ucrânia	210	210	110	180	180	180
Uzbequistão	-	-	-	-	25	20
Outros países	2.700	3.300	2230	3.150	3.480	3.500
Produção total aproximada	19.000	20.600	18.500	16.300	18.200	18.000

Fonte: Adaptado de USGS-*Mineral Commodity Summaries* (2018 – 2022).

Quanto ao Brasil, a maior parte das reservas nacionais está concentrada nos estados da Paraíba, São Paulo e Bahia, expressando, aproximadamente, 49,8%, 33,6% e 15,3%, respectivamente (ANM, 2018). De acordo com a Agência Nacional de Mineração – ANM (2018) e com os dados mais atuais disponíveis entre os anos de 2015 a 2017, há uma produção (em toneladas) gerada para cada tipo de produto da bentonita, considerando sua produção no estado natural (argila bruta - não processada), moída seca, e ativada, bem como a quantidade comercializada para cada tipo, discriminadamente, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Principais estatísticas da produção da Bentonita no Brasil.

Discriminação		Produção (t)		
		2015	2016	2017
Produtos	Bruta	602.846	448.004	616.929
	Comercializada bruta	146.311	108.449	127.892
	Moída seca	22.334	31.267	39.531
	Comercializada moída seca	22.172	31.406	39.409
	Ativada	364.439	309.099	271.154
	Comercializada ativada	369.607	312.067	342.826

Fonte: Adaptado de ANM (2018).

Em suma, devido a todas as vantagens supracitadas é que a argila bentonítica possui um grande potencial de aplicação, tanto em áreas mais tradicionais, isto é, em aplicações de lama de perfuração, pelletização de minério de ferro e areia de fundição, como em áreas mais tecnológicas que requerem maior purificação, como em produtos cosméticos, farmacêuticos, alimentícios, agente filtrantes, revestimento e enchimento em papel, entre outras (Allo & Murray, 2004; Nogueira *et al.*, 2022; Ramalho *et al.*,

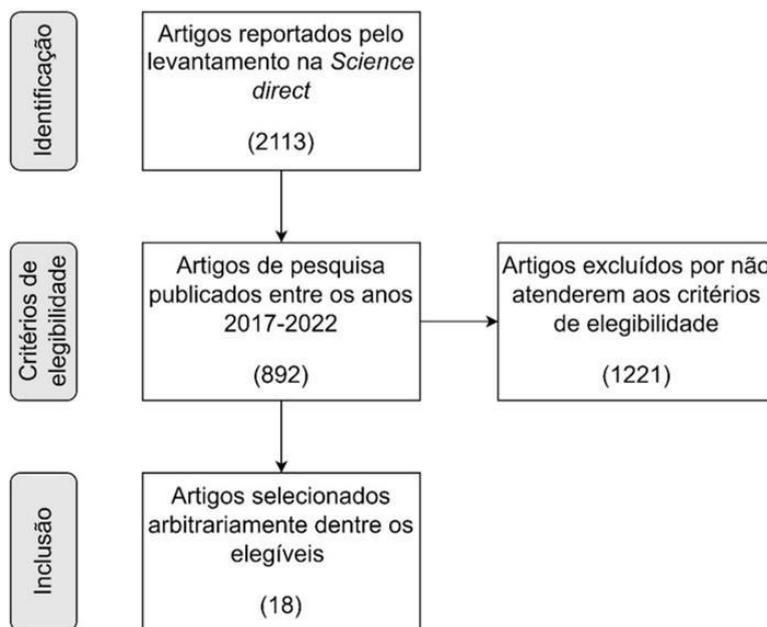
2021). O presente trabalho teve por objetivo apresentar uma breve revisão sobre a argila bentonita, correlacionando suas propriedades e algumas das principais áreas de aplicação à luz de pesquisas prévias reportadas pela literatura científica, almejando colaborar com a compreensão da temática.

2. Metodologia

Este trabalho trata-se de uma revisão narrativa da literatura, a qual caracteriza-se por uma abordagem ampla com seleção arbitrária de artigos que podem auxiliar na fundamentação de trabalhos teóricos, como teses, dissertações e trabalho de conclusão de curso. Logo não exige um protocolo rígido de metodologia, haja vista que não se faz necessário esgotar as fontes de informação, mas relacioná-las para a construção daquilo que se aspira compreender ou apresentar (Cordeiro *et al.*, 2007).

Portanto, realizou-se uma busca e seleção de trabalhos científicos acerca da bentonita e suas principais aplicações descritas pela literatura disponível na base de documentos científicos *Science Direct*. Assim, o protocolo da busca baseou-se na utilização do termo “*bentonite*” combinado a algumas aplicações (ver em Tabela 4), em inglês, contidas nos campos de título, resumo, e palavras-chave especificadas pelos autores, resultando em um total de 2113 trabalhos reportados pela base, os quais passaram por processo de refinamento. Como critério de elegibilidade, considerou-se apenas os títulos que correspondiam a “artigos de pesquisa”, publicados entre os anos de 2017 a 2022 (892 artigos). Finalmente, foram selecionados arbitrariamente 18 artigos dentre os elegíveis, os quais compuseram o corpus da pesquisa. O levantamento foi realizado em dezembro de 2022. A Figura 5 apresenta a distribuição e refinamento dos resultados reportados pela base *Science Direct* para as palavras-chave utilizadas no levantamento.

Figura 5 – Fluxograma de seleção dos artigos.



Fonte: Autoria própria (2022).

Conforme Abad e Abad (2021), a análise de conteúdo é a validação de hipóteses e descobertas por trás de um determinado tema que tem a função principal em uma aplicação. Dessa forma, realizou-se uma análise de conteúdo nos artigos selecionados e incluídos no corpus da pesquisa, no sentido de melhor apresentar os dados e informações pertinentes aos tipos de aplicações da bentonita aqui discutidos.

3. Resultados e Discussão

A partir da investigação realizada na literatura, percebeu-se que são muitas as aplicações nas quais a bentonita pode ser empregada, tanto em seu estado natural, quanto modificada. Entretanto, aquelas com maior destaque são em remediação ambiental, nas áreas cosmética e farmacêutica, biomédica, e na indústria de construção civil.

De maneira geral, tais aplicações somente são viáveis devido às propriedades interessantes apresentadas pela bentonita, como composição química, grande capacidade de troca catiônica, alta superfície específica e carga superficial, plasticidade, elevado grau de inchamento em ambiente úmido, alta capacidade de absorção, alta viscosidade, tixotropia, entre outras (Allo & Murray, 2004; Baltar *et al.*, 2010; Coelho & Cabral Junior, 2010).

A Tabela 4, apresenta os resultados reportados pelo levantamento no banco de dados da *Science Direct*, a qual relaciona os tipos de aplicações e seus respectivos números de publicações. Considerando apenas os artigos elegíveis, percebe-se, a partir desses números, que há um grande interesse na área de tratamento de água (630 artigos), com destaque para as pesquisas em adsorção (605 artigos). Esses sistemas são muito empregados quando se requer tratamento de efluentes e águas residuais, no sentido de remediar a poluição ambiental resultante da ação antrópica. Um segundo destaque foi o uso da bentonita na indústria cerâmica e de construção civil (180 artigos), também voltado para a redução desses impactos ambientais. Como enfatizado por Tura e Ojanen (2022), é crescente o interesse em temas com foco em sustentabilidade, em função do impacto causado pelo desenvolvimento indústria I, gerando alerta para os riscos provocados pelos meios de produção.

Comparativamente, à aplicação sobre tratamento de água, áreas de aplicação como cosmética e farmacológica, biomédica, indústria cerâmica e de construção civil apresentaram um volume bem menor de publicações. Contudo, destaca-se que foi avaliada apenas uma única base de dados, e estes dados não representam o panorama geral da área. Não obstante, pode-se ter uma ideia da produção científica da temática proposta, e quais vertentes vêm sendo investigadas com maior frequência pelos pesquisadores nos últimos anos.

Tabela 4 - Levantamento quantitativo de algumas aplicações da Bentonita.

Argila	Aplicações	Nº de artigos reportados pelas bases	Nº de artigos selecionados pela busca (elegíveis)
Bentonita (natural e modificada)	Tratamento de água		
	• Adsorção	1544	605
	• Fotocatálise	40	25
	Cosmética e Farmacológica		
	• Cosmética	18	10
	• Farmacêutica	76	29
	Biomédica		
	• Antibacteriana	40	26
	• Entrega de fármacos	29	17
	Indústria Cerâmica e de Construção civil		
• Revestimento	151	79	
• Argamassa	48	21	
• Concreto	154	70	
• Materiais cimentícios suplementares	13	10	

Fonte: Autoria própria (2022).

Dentre os resultados reportados pela plataforma, após refinamento, foram selecionados arbitrariamente 18 artigos dentre os elegíveis, os quais foram incluídos no corpus da pesquisa, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Artigos selecionados para a pesquisa.

Aplicação	Título	Autor (Ano)	DOI
Tratamento de água	<i>Application of Ethiopian bentonite for water treatment containing zinc</i>	Tadesse, S. H. (2022)	https://doi.org/10.1016/j.emcon.2022.02.002
	<i>Adsorption of sodium from saline water with natural and acid activated Ethiopian bentonite</i>	Musie, W., & Gonfa, G. (2022)	https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100440
	<i>Modified bentonite by polyhedral oligomeric silsesquioxane and quaternary ammonium salt and adsorption characteristics for dye</i>	Meng, B. <i>et al</i> (2020)	https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.01.007
	<i>Photocatalytic degradation of deltamethrin by using Cu/TiO₂/bentonite composite</i>	Ahmad, S., & Yasin, A. (2020)	https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.07.019
Cosmética e Farmacológica	<i>Preparation and evaluation of the doxazosin-bentonite composite as a pH-dependent controlled-release oral formulation</i>	Baek <i>et al.</i> (2022)	https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106677
	<i>Thiabendazole/bentonites hybrids as controlled release systems</i>	Cavalcanti <i>et al.</i> (2019)	https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.12.030
	<i>Evaluation and characterization of Melo Bentonite clay for cosmetic applications</i>	Favero <i>et al.</i> (2019)	https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.04.004
	<i>Cosmetic and pharmaceutical qualifications of Egyptian bentonite and its suitability as drug carrier for Praziquantel drug</i>	Dardir <i>et al.</i> (2018)	https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.01.041
Biomédica	<i>Bentonite clay incorporated topical film formulation for delivery of trimetazidine: control of ocular pressure and in vitro-in vivo correlation</i>	Swain <i>et al.</i> (2022)	https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102956
	<i>Studies on novel chitosan/alginate and chitosan/bentonite flexible films incorporated with ZnO nano particles for accelerating dermal burn healing: In vivo and in vitro evaluation</i>	Nozari <i>et al.</i> (2021)	https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102956
	<i>Fabrication of multifunctional chitosan-based nanocomposite film with rapid healing and antibacterial effect for wound management</i>	Shanmugapriya <i>et al.</i> (2018)	https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.066
	<i>Ionic liquid-mediated: Enhanced surface morphology of silver/manganese oxide/bentonite nanocomposite for improved biological activities</i>	Sundrarajan <i>et al.</i> (2018)	https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.018
	<i>Ag/TiO₂/bentonite nanocomposite for biological applications: Synthesis, characterization, antibacterial and cytotoxic investigations</i>	Krishnan, B., & Mahalingam, S. (2017a)	https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.065
	<i>Improved surface morphology of silver/copper oxide/bentonite nanocomposite using aliphatic ammonium based ionic liquid for enhanced biological activities</i>	Krishnan, B., & Mahalingam, S. (2017b)	https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.06.104
	<i>Sustainable incorporation of lime-bentonite clay composite for production of ecofriendly bricks</i>	Javed <i>et al.</i> (2020)	https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.06.007
Indústria Cerâmica e de Construção Civil	<i>Experimental investigation on effects of calcined bentonite on fresh, strength and durability properties of sustainable self-compacting concrete.</i>	Laidani <i>et al.</i> (2020)	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121469
	<i>Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars.</i>	Liu <i>et al.</i> (2020)	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118015
	<i>Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar</i>	Yang <i>et al.</i> (2019)	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117062

Fonte: Autoria própria (2022).

3.1 Aplicação em tratamento de água

Devido ao intenso crescimento industrial, ao aumento populacional, assim como o acelerado desenvolvimento na agricultura moderna, claramente mostrou-se necessário buscar soluções para os problemas que afetam a natureza, no sentido de prevenir a degradação ambiental e desenvolver técnicas capazes de diminuir ou eliminar a poluição resultante das atividades humanas (Ahmad & Yasin, 2020).

A água é um recurso natural amplamente explorado e essencial para a vida, logo, são muitos os estudos que se dedicam em investigar meios de promover a recuperação de águas contaminadas e prevenir a poluição de corpos hídricos. Assim sendo, dois processos muito importantes podem ser destacados, a adsorção e a fotocatalise. A adsorção é amplamente utilizada para a remoção de íons metálicos e outras impurezas que ocorrem quando as partículas líquidas ficam retidas na superfície de sólidos. A fotocatalise é muito utilizada para fotodegradação de contaminantes nocivos através da radiação da luz, que é causada pela absorção de fótons de luz (catalisador) que possuem a capacidade de produzir radicais livres. São técnicas que possuem um baixo custo, efetividade e podem ser aplicadas em fontes naturais, como argilas bentoníticas (Ahmad & Yasin, 2020; Musie & Gonfa, 2022; Tadesse, 2022).

Tadesse (2022) realizou um estudo sobre a aplicação da bentonita etíope para tratamento da água contendo zinco, revelando ser a argila natural adequada para uso na purificação de água e tratamento de efluentes. Em seus resultados pôde-se comprovar que a bentonita da Etiópia é um componente eficaz para a remoção do íon Zn^{2+} de solução aquosa, pois em uma concentração destes íons de 74,62 mg/L com a quantidade de dosagem do adsorvente de 1,35 g (calculada por otimização numérica), teve um tempo de adsorção máxima de 90 minutos de duração.

Musie e Gonfa (2022) fizeram um estudo sobre a adsorção de sódio de água salina com bentonita etíope natural e ativada por ácido. Os autores constataram melhora na área superficial específica da bentonita, sendo a área específica máxima de 238 m^2/g para 3M H_2SO_4 por 6 h de tempo de ativação. Uma remoção máxima de sódio de 24% foi alcançada para a bentonita ativada.

Meng *et al.* (2020) desenvolveram um estudo sobre a bentonita modificada por silsesquioxano oligomérico poliédrico e sal de amônio quaternário para adsorção do corante catiônico azul de metileno (AM). Verificou-se que a taxa de remoção cresce com o aumento do pH e da concentração de KCl que é o principal mecanismo de adsorção deste tipo de corante, envolvendo solubilização hidrofóbica e ação eletrostática. Foram estudados parâmetros cinéticos e termodinâmicos. Os padrões cinéticos demonstraram que a adsorção do AM nesta bentonita modificada pode ser bem ajustada ao modelo cinético de pseudo-segunda-ordem ($R^2 = 0,99967$) e ao método isotérmico de Dubinin-Radushkevich ($R^2 = 0,94339$). Já os parâmetros termodinâmicos demonstraram um processo de adsorção endotérmico, isto é, com absorção de energia em forma de calor (variação da entalpia), e espontâneo, em relação à variação da energia livre de Gibbs.

Ahmad e Yasin (2020) usaram os compósitos formados por TiO_2 -bentonita e Cu- TiO_2 -bentonita para degradação fotocatalítica de deltametrina. Na investigação, observaram que tanto a fotodegradação da deltametrina quanto a remoção máxima são favorecidas em pH 12, de modo que pequenas concentrações de catalisadores são necessárias para o processo de degradação. Os autores concluíram que o compósito de bentonita possui uma boa eficiência, exemplificado no caso da TiO_2 -bentonita e Cu- TiO_2 -bentonita, por 87,01% e 97,48% de degradação, respectivamente.

3.2 Aplicações cosméticas e farmacêuticas

Entre as argilas utilizadas para aplicações médicas, farmacêuticas e cosméticas, a bentonita ganhou destaque por sua disponibilidade e baixo custo, tamanho de partícula pequeno, alta capacidade de adsorção e não toxicidade (Dardir *et al.*, 2018), versatilidade de biocompatibilidade e eficácia no que concerne às aplicações em diversos processos tecnológicos (Trigueiro *et al.*, 2018).

Afim de que o produto se torne destinado ao uso em medicamentos, seja como matéria-prima ou como ingrediente farmacêutico ativo, este deve atender a diferentes requisitos de segurança, estabilidade e alto grau de inatividade química. Outrossim, para a utilização desses produtos na área farmacêutica, ele deve ser químico e microbiologicamente inofensivo (Elshater *et al.*, 2018).

Portanto, a bentonita foi introduzida como componente em várias formulações farmacológicas, nas quais são usados como excipientes (agentes desintegrantes, carreadores e liberadores de ingredientes ativos, aglutinantes e diluentes, agentes emulsificantes, espessantes e antiaglomerantes), ingredientes ativos (antiácidos, protetores gastrointestinais, antidiarreicos, protetores dermatológicos) e cosméticos (cremes, pós e emulsões) (Babahoum & Ould Hamou, 2021).

No campo da cosmética, a aplicação das argilas está diretamente relacionada à sua composição mineralógica e química. O uso da bentonita natural para aplicações cosméticas é controlada principalmente por sua capacidade de troca catiônica, área superficial específica, composição mineralógica, índice de inchamento, propriedades coloidais e sua capacidade de absorção e adsorção. Assim, Dardir *et al.* (2018) relatam em seu trabalho que as aplicações cosméticas de argilas se restringem ao uso externo como tratamento de pele e facial.

Favero *et al.* (2019) realizaram um estudo que consistiu na avaliação do potencial de aplicação da Melo Bentonita (BEM) em comparação com a argila Bentonítica (BE), como agente suspensor em produtos de cosmetologia através da caracterização física e química, avaliando a capacidade de suspensão dessas argilas. Para isto, foi preparada uma suspensão de BEM contendo calamina, com o objetivo de avaliar a influência desta argila na velocidade de sedimentação e no volume de sedimento formado na suspensão. Foi possível notar que as características das amostras eram compatíveis com as da argila BE. As principais reflexões de todas as amostras foram esmectita e quartzo típicos. A avaliação da capacidade suspensora e aumento da viscosidade indicou que o BEM não promoveu melhores resultados quando comparado ao BE, argila já utilizada nos setores farmacêutico e cosmético. No entanto, em relação ao pH, o BEM apresentou um resultado melhor quando comparado ao BE.

Dardir *et al.* (2018) desenvolveram um estudo com o objetivo de caracterizar e avaliar depósitos de bentonita recém-descobertos no Egito para aplicações farmacêuticas e cosméticas, bem como sua adequação como carreador do fármaco Praziquantel. O estudo foi realizado para a amostra de bentonita bruta, bentonita purificada e bentonita purificada ativada por álcali. A investigação das propriedades farmacopeicas de pH, volume de sedimentação e capacidade de intumescimento revelou a adequação das amostras brutas e purificadas para aplicações farmacêuticas e cosméticas. As amostras estavam livres de patógenos microbianos e atuaram como carreadores eficientes para o medicamento Praziquantel. A capacidade máxima de carga de 100 mg da droga foram 62%, 78,4% e 93,2% para bentonita bruta, bentonita purificada e ativada por álcali, respectivamente.

Baek *et al.* (2022) prepararam e caracterizaram uma formulação composta de doxazosina-bentonita (DXBT) para entrega oral controlada e então avaliou-se a farmacocinética, isto é, adsorção e troca catiônica dependente do pH. A doxazosina (DX) foi escolhida como droga modelo neste estudo. É um bloqueador seletivo do receptor adrenérgico α -1 que atua no músculo liso vascular. As caracterizações físico-químicas do composto DXBT revelaram que DX foi adsorvido em bentonita na forma amorfa. Em um estudo farmacocinético *in vivo* após administração oral em ratos, o composto DXBT resultou em um pico de concentração plasmática significativamente menor, meia-vida terminal e tempo médio de residência de DX mais longos em comparação com a solução DX. Assim, o composto DXBT pode ser uma plataforma de entrega oral de drogas com perfis de liberação controlada dependentes de pH com base na propriedade única de troca iônica de bentonita.

Cavalcanti *et al.* (2019) desenvolveram um estudo do sistema tiabendazol/bentonita para liberação de fármacos, com o objetivo de investigar a influência dos cátions interlamelares da bentonita na interação com o tiabendazol. Bentonitas trocadas de sódio (BentNa), cálcio (BentCa) e magnésio (BentMg) foram utilizadas para a adsorção de tiabendazol (TBZ), e seu potencial uso como sistemas de liberação controlada foi avaliado. Bentonita pura e bentonita trocada foram caracterizadas e a influência de diferentes parâmetros como pH, tempo de contato e concentração inicial do fármaco foi investigada. O sistema BentMg-TBZ

exibiu a maior liberação cumulativa em comparação com as outras amostras. Os diferentes testes demonstraram que a natureza do cátion interlamelar na bentonita influenciou as quantidades de carga e liberação de tiabendazol. Isto os tornam bons sólidos de sistemas de liberação *in vitro* de drogas, um parâmetro chave que deve ser considerado na aplicação de bentonitas como veículos de drogas.

3.3 Aplicações biomédicas

A bentonita tem despertado grande interesse em terapias no campo da biomedicina por influenciar na atividade antibacteriana. Assim, devido sua alta área superficial, estrutura de camadas e CTC, consegue atuar como material absorvente e adsorvente, expansivo, não tóxico e biocompatível, além de influenciar na melhoria de resistência mecânica (Krishnan & Mahalingam, 2017a; Nozari *et al.*, 2021).

Para aplicações biomédicas que envolvem diagnóstico e tratamento, como biosensores, biotransportadores, implantes e curativos são avaliados o método de síntese, a melhoria de propriedades biológicas bem como a avaliação dessas propriedades *in vitro* e *in vivo* (Bonifacio *et al.*, 2020; Krishnan & Mahalingam, 2017a; Nozari *et al.*, 2021; Sundraraja *et al.*, 2018).

Krishnan e Mahalingam (2017a) investigaram as propriedades antibacterianas e citotóxicas *in vitro* de nanocompósitos de Ag/TiO₂/Bentonita (Bent). Essas mesmas características também foram investigadas em um nanocompósito de Ag/CuO/Bent com e sem Líquido Iônico (LI) para possíveis aplicações em implantes, pelos mesmos autores em outro trabalho (Krishnan & Mahalingam, 2017b). Em ambos estudos, as amostras foram sintetizadas por decomposição térmica. Foi observado que o substrato foi efetivo na intercalação das nanopartículas tanto no interior quanto na superfície, o que promoveu aumento da área superficial específica e porosidade do material nanocompósito, contribuindo para interação deste com a parede celular das bactérias. No entanto, para o Ag/CuO/Bent/LI percebeu-se maior controle da morfologia, tamanho e forma das nanopartículas de Ag/CuO intercaladas e conseqüentemente melhoria da atividade antibacteriana e biocompatibilidade. Devido à contribuição do LI na síntese do nanocompósito Ag/CuO/Bent/LI, houve melhoria da atividade antibacteriana contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, bem como não toxicidade contra células HEK 293 (rim embrionário) em baixas concentrações a longo prazo. De acordo com os autores, os bons resultados do nanocompósito Ag/CuO/Bent/LI em aplicações *in vitro* o torna promissor para aplicações *in vivo*.

Semelhante a Krishnan e Mahalingam (2017b), a influência de líquidos iônicos à base de amônio na formação, capeamento, estrutura de auto arranjo, nucleação e crescimento de materiais de intercalação em argilas bentonitas também foram investigados por Sundrarajan *et al.* (2018), verificando a importância da análise desse sistema. Em seu estudo, Sundrarajan *et al.* (2018) observaram o efeito de LI para a intercalação de grande quantidade de partículas de Ag/Mn₃O₄ na bentonita. Através da análise *in vitro* a respeito da atividade antibacteriana, os autores observaram que devido a interação entre a carga positiva de íons metálicos do biocompósito e cargas negativas de grupos funcionais da parede celular de bactérias gram-positivas, o nanocompósito adsorveu as bactérias, penetrou na parede celular e provocou a morte destas por inibição dos processos celulares.

Além da atividade antibacteriana, outra propriedade interessante da bentonita para aplicações biomédicas é seu uso como reforço mecânico na produção de filmes para tratamentos de feridas. Conforme Shanmugapriya *et al.* (2018), que sintetizaram um biomaterial de Quitosana-Polivinilpirrolidona-Bentonita (CS-PVP-BN), a argila atuou tanto como reforço mecânico como agente antibacteriano. Os testes *in vitro* e *in vivo* demonstraram que tais propriedades da Bentonita foram essenciais para o sucesso deste estudo. Os ferimentos tratados com esse filme obtiveram melhor cicatrização e com seu fechamento completo, comparativamente ao tratamento convencional. Embora os filmes “controle” ao final do 16º dia tenham contribuído para a cicatrização do ferimento, acabaram por aderirem à pele, e provocaram ruptura da mesma e inflamação local ao serem removidos. Isto não ocorreu com os filmes de bentonita em estudo, que, além de auxiliar na rápida cicatrização e exibirem atividade antibacteriana, também foram de fácil remoção.

Nozari *et al.* (2021) utilizaram a Bentonita na formulação de filmes com quitosana e ZnO para produção de curativos. Os filmes obtidos mantiveram sua flexibilidade e ganharam resistência mecânica com adição da bentonita, a qual contribuiu para a formação de uma estrutura lisa, contínua e uniforme, capaz de absorver grande quantidade de água (170%) devido à sua afinidade e a CTC, mantendo a integridade do curativo. Através do ensaio *in vitro* foi comprovada a citocompatibilidade. Já por testes *in vivo*, confirmou-se a excelente cicatrização dos ferimentos após 7 dias, explicado pela troca catiônica entre os íons de cálcio da bentonita e íons de sódio do exsudato, que promoveu um hidrogel na superfície do ferimento e auxiliou no processo de cicatrização.

Boa interação argila/fármaco, permeação e sustentação foram encontrados nos trabalhos de Swain *et al.* (2022) durante a formulação de filmes à base da bentonita para tratamento tópico de TZ (trimetazidina) para o controle da pressão ocular. Em coelhos tratados com esta formulação de filme, a pressão intraocular foi reduzida em quase 30% em 240 min e persistiu até 360 min, e uma boa correlação *in vitro* - *in vivo* também foi estabelecida. A formulação do filme contendo bentonita apresentou valores mais altos de energia de ligação negativa em comparação com a formulação sem bentonita, indicando interação estável com biodisponibilidade melhorada e efeito sustentado. Desse modo, o filme de bentonita/TZ pôde ser utilizado no controle e gerenciamento da pressão intraocular em coelhos.

3.4 Indústria cerâmica e construção civil

A crescente demanda por matérias-primas/produtos para o desenvolvimento do setor de construção civil também tem promovido alguns problemas ambientais e com grande preocupação, a exemplo, poluição do solo (depósito de resíduos) e do ar (liberação de CO₂) gerados em função da produção e consumo do cimento (Matos *et al.*, 2021). Desse modo, atualmente, existem diversos estudos que visam meios para a mitigação desses impactos, além da redução de custos da produção do cimento. Estas investigações propõem desde a reutilização de rejeitos, uso de matérias-primas naturais e Materiais Cimentícios Suplementares (Gupta & Chaudhary, 2022; Laidani *et al.*, 2020).

Assim, nas últimas décadas, a pesquisa e aplicação da bentonita têm despertado grande interesse no ramo da construção civil, devido às suas propriedades de impermeabilidade, resistência à compressão, plasticidade e baixa compressibilidade (Yang *et al.*, 2019). Tais propriedades agregam valor ao amplo uso em argamassas, concreto, tijolos, etc. Além de ser uma alternativa viável para redução dos impactos ambientais, também possui eficácia na aplicação e processamento simples.

Em estudo realizado pelos autores Yang *et al.* (2019), que utilizaram a bentonita como aditivos em argamassas cimentícias, foi observado o efeito da mesma na estrutura porosa e na permeabilidade da argamassa cimentícia. Os resultados obtidos indicaram que a adição de 8% de bentonita em materiais cimentícios propiciou um aumento significativo na resistência à compressão (61,48%), resistência à flexão (42,09%) e impermeabilidade (76,47%). Além disso, também houve uma redução de 67,3% no tamanho crítico dos poros.

Liu *et al.* (2020) estudaram três tipos diferentes de bentonita: sódica, cálcica e magnésica, as quais foram adicionadas à argamassa cimentícia em diferentes proporções para investigar seus efeitos na resistência mecânica e impermeabilidade. Foi possível observar que os três tipos de bentonitas melhoraram significativamente o desempenho da argamassa cimentícia na medida em que ocorre um aumento do teor da bentonita nesta argamassa. Além disso, devido às propriedades de impermeabilização da bentonita, houve uma melhor durabilidade e uma maior resistência da argamassa cimentícia.

Laidani *et al.* (2020) avaliaram o efeito do uso de bentonita calcinada (BC) em substituição parcial ao cimento Portland comum na durabilidade do concreto autoadensável. Os resultados mostraram que a incorporação em até 20% da BC proporcionou uma alta resistência à permeabilidade e uma melhor resistência à compressão. A bentonita calcinada é um material que pode ser usado para qualquer tipo de concreto, distintas construções e estruturas com baixo impacto ambiental, concluíram os autores.

Por outro lado, o estudo proposto por Javed *et al.* (2020) visou fornecer uma solução ecológica ao processo tradicional de fabricação de tijolos. Para tal, compostos localmente disponíveis de bentonita em pó foram incorporados em tijolos prensados (e não queimados), enquanto as propriedades dos tijolos queimados foram investigadas para comparação. O estudo demonstrou que com a adição de até 20% de bentonita em tijolos comprimidos, ocorreram diversos benefícios, como aumento na resistência à compressão e à flexão, além de benefícios ao meio ambiente e redução de custos finais.

4. Conclusão

A bentonita tornou-se de grande interesse para as mais diversas aplicações, pois é um material abundante na natureza que possui propriedades interessantes, tais como inércia química, grande capacidade de troca catiônica, plasticidade, elevado grau de inchamento em ambiente úmido, alta superfície específica, dentre outras. Tais propriedades são requeridas visando aplicações em remediação ambiental, nas áreas cosmética e farmacêutica, biomédica, e na indústria de construção civil, seja no uso da bentonita em estado natural ou modificada quimicamente.

O levantamento da produção científica na base *Science Direct* evidencia o potencial da bentonita nas aplicações supracitadas, com destaque para o campo da adsorção, inserido na área de tratamento de água. Portanto, conclui-se que a bentonita é um argilomineral muito versátil e com grande potencial tecnológico, o que a possibilita ser empregada na modificação e desenvolvimento de novos materiais para diversas aplicações.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros, a realização de uma prospecção tecnológica através de um mapeamento científico e patentário, visando identificar as principais tecnologias para a geração de produtos e processos nas mais diversas áreas da indústria à qual a bentonita se aplica.

Agradecimentos

As bolsas de pesquisa PIBITI (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação) e PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica) da Universidade Federal do Piauí, e PIBIC da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI).

Referências

- Abad, A., & Abad, T. M. (2021). Análise de conteúdo na pesquisa qualitativa. *Alternativas Cubanas En Psicología*, 10(28), 23–32. <https://www.researchgate.net/publication/362815417>
- Ahmad, S., & Yasin, A. (2020). Photocatalytic degradation of deltamethrin by using Cu/TiO₂/bentonite composite. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(11), 8481–8488. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.07.019>
- Allo, W. A., & Murray, H. H. (2004). Mineralogy, chemistry and potential applications of a white bentonite in San Juan province, Argentina. *Applied Clay Science*, 25(3–4), 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.10.003>
- Amorim, L. V., Dantas Viana, J., Farias, K. V., Rocha Barbosa, M. I., & Ferreira, C. (2006). Estudo Comparativo entre Variedades de Argilas Bentoníticas de Boa Vista, Paraíba. *Revista Matéria*, 11(1), 30–40.
- ANM. (2018). *Agência Nacional de Mineração - Bentonita*. 1, 3–5. https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-contenido/publicacoes/serie-estatisticas-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/bentonita_sm_2018
- Babahoum, N., & Ould Hamou, M. (2021). Characterization and purification of Algerian natural bentonite for pharmaceutical and cosmetic applications. *BMC Chemistry*, 15(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13065-021-00776-9>
- Baek, M. J., Shin, H. J., Park, J. H., Kim, J., Kang, I. M., Lee, J. I., & Kim, D. D. (2022). Preparation and evaluation of the doxazosin-bentonite composite as a pH-dependent controlled-release oral formulation. *Applied Clay Science*, 229(August), 106677. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106677>
- Baltar, Carlos A. M., Sampaio, João A., & Oliveira, Glenda A. R. (2010). Estudo das condições para a modificação superficial de uma Bentonita. (CETEM/UFPE), 39-46. [http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1238/1/Part 1.4 Anais_segundo_simposio_minerais_industriais_do_nordeste.pdf](http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1238/1/Part%201.4%20Anais_segundo_simposio_minerais_industriais_do_nordeste.pdf)
- Barbieri, D. M., Lou, B., Dyke, R. J., Chen, H., Zhao, P., Memon, S. A., & Hoff, I. (2022). Calcium bentonite and sodium bentonite as stabilizers for roads unbound. *Cleaner Engineering and Technology*, 6(June 2021), 100372. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100372>

- Bonifacio, M. A., Cochis, A., Cometa, S., Scalzone, A., Gentile, P., Procino, G., Milano, S., Scalia, A. C., Rimondini, L., & De Giglio, E. (2020). Advances in cartilage repair: The influence of inorganic clays to improve mechanical and healing properties of antibacterial Gellan gum-Manuka honey hydrogels. *Materials Science and Engineering C*, 108(November 2019), 110444. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110444>
- Brito, A. C. O. (2019). *Espectroscopia no infravermelho associada à quimiometria para análise da formação de agregados no sistema argila polifosfato* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- Cavalcanti, G. R. S., Fonseca, M. G., da Silva Filho, E. C., & Jaber, M. (2019). Thiabendazole/bentonites hybrids as controlled release systems. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 176(December 2018), 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.12.030>
- Coelho, J. M., & Cabral Junior, M. (2010). *Estudo prospectivo da bentonita: tendências de mercado* (CETEM/UFPE, Ed.). II Simpósio De Minerais Industriais Do Nordeste. <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1235>
- Dardir, F. M., Mohamed, A. S., Abukhadra, M. R., Ahmed, E. A., & Soliman, M. F. (2018). Cosmetic and pharmaceutical qualifications of Egyptian bentonite and its suitability as drug carrier for Praziquantel drug. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 115(December 2017), 320–329. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.01.041>
- Elshater, A., Elhaddad, A., Elattaar, A., Abugharbia, M., & Soliman, W. (2018). Characterisation of the Egyptian Pliocene bentonite from the Sohag region for pharmaceutical use. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(14). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3691-3>
- Favero, J. da S., dos Santos, V., Weiss-Angeli, V., Gomes, L. B., Veras, D. G., Dani, N., Mexias, A. S., & Bergmann, C. P. (2019). Evaluation and characterization of Melo Bentonite clay for cosmetic applications. *Applied Clay Science*, 175(August 2018), 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.04.004>
- Garnica, A. I. C., Curbelo, F. D. da S., Magalhães, R. R., & De Sousa, R. P. F. (2018). Efeitos De Surfactantes Na Organofiliação De Argilas Bentoníticas Para Uso Em Fluidos De Perfuração De Base Microemulsionada. *Holos*, 4, 89–105. <https://doi.org/10.15628/holos.2018.7089>
- Gupta, S., & Chaudhary, S. (2022). State of the art review on supplementary cementitious materials in India – II: Characteristics of SCMs, effect on concrete and environmental impact. *Cleaner Production*, 357, 131945. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121203>
- Javed, U., Khushnood, R. A., Memon, S. A., Jalal, F. E., & Zafar, M. S. (2020). Sustainable incorporation of lime-bentonite clay composite for production of ecofriendly bricks. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121469. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121469>
- Karakaya, M. Ç., Karakaya, N., & Bakir, S. (2011). Some properties and potential applications of the Na- and Ca-bentonites of ordu (N.E. Turkey). *Applied Clay Science*, 54(2), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.08.003>
- Krishnan, B., & Mahalingam, S. (2017a). Ag/TiO₂/bentonite nanocomposite for biological applications: Synthesis, characterization, antibacterial and cytotoxic investigations. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2265–2280. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.06.007>
- Krishnan, B., & Mahalingam, S. (2017b). Improved surface morphology of silver/copper oxide/bentonite nanocomposite using aliphatic ammonium based ionic liquid for enhanced biological activities. *Journal of Molecular Liquids*, 241, 1044–1058. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.06.104>
- Laidani, Z. E. A., Benabed, B., Abousnina, R., Gueddouda, M. K., & Kadri, E. H. (2020). Experimental investigation on effects of calcined bentonite on fresh, strength and durability properties of sustainable self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 230, 117062. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117062>
- Liu, M., Hu, Y., Lai, Z., Yan, T., He, X., Wu, J., Lu, Z., & Lv, S. (2020). Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 241, 118015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118015>
- Luckham, P. F., & Rossi, S. (1999). The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 82(1), 43–92. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(99\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(99)00005-6)
- Matos, W. E. de C., da Silva, H. de J. B., da Paz, G. M., & Dos Santos, V. B. (2021). Utilization of sugarcane bagasse ashes as filler or pozzolanic material for the cementitious mortar production: A review. *Revista Materia*, 26(4). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1322>
- Meng, B., Guo, Q., Men, X., Ren, S., Jin, W., & Shen, B. (2020). Modified bentonite by polyhedral oligomeric silsesquioxane and quaternary ammonium salt and adsorption characteristics for dye. *Journal of Saudi Chemical Society*, 24(3), 334–344. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.01.007>
- Murray, H. H. (2000). Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: A general overview. *Applied Clay Science*, 17(5–6), 207–221. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(00\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00016-8)
- Murray, H. H. (2007). Occurrences, processing and application of kaolins, bentonite, palygorskite- sepiolite, and common clays. *Developments in Clay Science*, 2. <https://doi.org/10.1177/1748895811401979>
- Musie, W., & Gonfa, G. (2022). Adsorption of sodium from saline water with natural and acid activated Ethiopian bentonite. *Results in Engineering*, 14(March), 100440. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100440>
- Nogueira, H. C. N., Sousa, A. A. P., & Paiva, W. (2022). Bentonita incorporada com rejeito de granito aplicada na pelotização de minério de ferro. *Research, Society and Development*, 11(4), 1–12. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27183>
- Nozari, M., Gholizadeh, M., Zahiri Oghani, F., & Tahvildari, K. (2021). Studies on novel chitosan/alginate and chitosan/bentonite flexible films incorporated with ZnO nano particles for accelerating dermal burn healing: In vivo and in vitro evaluation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 184(March), 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.066>
- Ramalho, W. J. C. R., Souza, M. F. de, & Ferreira, H. S. (2021). Investigação do efeito viscosificante e estabilizante de argilas hidrofílica e hidrofóbica em fluidos emulsionados de base oleoso. *Research, Society and Development*, 10(3), e3910312927. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.12927>
- Santos, P. de S. (1989). *Ciência e Tecnologia de Argilas* (E. Blucher, Ed.; 2ª edição).

Shanmugapriya, K., Kim, H., Saravana, P. S., Chun, B. S., & Kang, H. W. (2018). Fabrication of multifunctional chitosan-based nanocomposite film with rapid healing and antibacterial effect for wound management. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 1713–1725. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.018>

Sundraraja, M., Bama, K., Selvanathan, G., & Ramesh Prabhu, M. (2018). Ionic liquid-mediated: Enhanced surface morphology of silver/manganese oxide/bentonite nanocomposite for improved biological activities. *Journal of Molecular Liquids*, 249, 1020–1032. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.065>

Swain, R., Nandi, S., Sahoo, R. N., Swain, S. S., Mohapatra, S., & Mallick, S. (2022). Bentonite clay incorporated topical film formulation for delivery of trimetazidine: Control of ocular pressure and in vitro-in vivo correlation. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 67(1), 102956. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102956>

Tadesse, S. H. (2022). Application of Ethiopian bentonite for water treatment containing zinc. *Emerging Contaminants*, 8, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2022.02.002>

Trigueiro, P., Pedetti, S., Rigaud, B., Balme, S., Janot, J. M., dos Santos, I. M. G., Gougeon, R., Fonseca, M. G., Georgelin, T., & Jaber, M. (2018). Going through the wine fining: Intimate dialogue between organics and clays. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 166, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.02.060>

Tura, N., & Ojanen, V. (2022). Sustainability-oriented innovations in smart cities: A systematic review and emerging themes. *Cities*, 126(April), 103716. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103716>

Yang, H., Long, D., Zhenyu, L., Yuanjin, H., Tao, Y., Xin, H., Jie, W., Zhongyuan, L., & Shuzhen, L. (2019). Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 224, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.073>