



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



MATHEUS VIRIATO EVANGELISTA

FOSFOGESSO: NOVOS HORIZONTES DE PESQUÍAS E APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL
DO MATERIAL

Uberlândia-MG
2025

MATHEUS VIRIATO EVANGELISTA

FOSFOGESSO: NOVOS HORIZONTES DE PESQUÍAS E APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL
DO MATERIAL

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para
aprovação na disciplina Introdução ao Trabalho
de Conclusão de Curso.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Miriam Maria de
Resende

Uberlândia-MG

2025

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de expressar meu sincero agradecimento a todos que contribuíram para a realização desta importante conquista

A Deus, meu guia constante, pela presença em todos os momentos e pelo cuidado que sempre me sustentou.

À minha família, pelo apoio incondicional e pelas orientações que foram fundamentais para meu crescimento pessoal e formação acadêmica.

À professora Miriam Maria de Resende, pela dedicação ao transmitir não apenas os valiosos ensinamentos em Engenharia durante os dois anos de iniciação científica, mas também por compartilhar lições de vida que levarei comigo. Registro aqui minha profunda admiração e gratidão.

Aos demais professores da FEQUI, que me mostraram que a Engenharia Química vai muito além de cálculos e processos industriais, revelando-se como uma área capaz de transformar conhecimentos científicos em inovações que impactam positivamente a sociedade, promovem sustentabilidade e melhoram a qualidade de vida das pessoas.

À Mayara Teixeira da Silva, que, com enorme carinho, paciência e cuidado, esteve ao meu lado durante os experimentos, sempre disposta a colaborar e a me incentivar a crescer, tanto na vida acadêmica quanto na profissional.

A todos os mestrandos e doutorandos do NUCBIO, que se fizeram presentes ao longo desta jornada, oferecendo suporte prático e compartilhando conhecimentos valiosos para a conclusão deste trabalho, em especial à doutoranda Amanda Carmelo da Rocha, cuja contribuição foi fundamental.

Aos grandes amigos e colegas de graduação Bárbara Ferreira, Brenno Bandeira e Malaquias Araújo, pelos ensinamentos, apoio e constante colaboração.

À dedicada colega de laboratório Giovanna Zanetti, pela parceria e incentivo no dia a dia.

Aos servidores técnicos e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se tornasse possível, deixo registrado meu mais sincero reconhecimento e gratidão.

RESUMO

O fosfogesso, subproduto da produção de ácido fosfórico, ele é gerado em grandes volumes globalmente, apresentando desafios significativos para a gestão ambiental devido à sua composição química, que inclui sulfato de cálcio, metais pesados e elementos radioativos. Este trabalho explora as principais vertentes de reaproveitamento sustentável do fosfogesso, com base em três estudos que abordam suas propriedades, limitações e aplicações potenciais em setores como construção civil, agricultura e tecnologias emergentes. Estudos evidenciam o uso do fosfogesso em engenharia rodoviária, destacando misturas estabilizadas com cinzas volantes, cal e ligantes hidráulicos, que demonstraram bom desempenho em pavimentação e aterros, reduzindo a necessidade de descartes inadequados. Ademais possui uma revisão detalhada das aplicações do fosfogesso, como substituto em materiais de construção, corretivo agrícola e fonte para a recuperação de elementos de terras raras, propondo tratamentos físicos e químicos para mitigar sua toxicidade e radioatividade. Por fim, o estudo realiza uma análise bibliométrica das tendências de pesquisa, identificando países líderes, tecnologias emergentes e novos materiais baseados em fosfogesso, com destaque para sua integração em uma economia circular. Os resultados indicam que, embora o fosfogesso represente um desafio ambiental significativo, ele também oferece oportunidades estratégicas para a sustentabilidade. A adoção de tecnologias de tratamento adequadas e políticas públicas voltadas para a valorização desse subproduto pode transformar um passivo ambiental em um recurso valioso. Este trabalho contribui para ampliar a compreensão sobre o potencial de reutilização do fosfogesso, oferecendo insights relevantes para aplicações práticas e para a formulação de estratégias que promovam o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Fosfogesso, sustentabilidade, reutilização.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exploração mundial de rocha fosfatada.....	12
Figura 2: Pilha de fosfogesso a céu aberto	13
Figura 3: Depósito de fosfogesso da empresa Mosaic em Cajati (SP).....	14
Figura 4: Depósito de fosfogesso da empresa Mosaic em Uberaba (MG).....	15
Figura 5: Blocos feitos de fosfogesso	25
Figura 6: Fosfogesso em pavimentação	26
Figura 7: Fosfogesso como gesso agrícola.....	28
Figura 8: Blocos restaurados por fosfogesso.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química típica do fosfogesso	11
---	----

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	8
1.1.	Objetivo geral.....	9
1.2.	Objetivos específicos.....	9
2.	METODOLOGIA	9
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1.	Composição Química do Fosfogesso.....	11
3.2.	Distribuição Geográfica.....	12
3.3.	Propriedades Físico-Químicas Relevantes para Aplicação.....	15
3.4.	Produção do ácido fosfórico	16
3.5.	Classificação legal e normativa do fosfogesso.....	17
3.6.	Potencial Radioativo e Seus Impactos Ambientais	18
3.7.	Contaminação de Solos e Recursos Hídricos	19
3.8.	Impactos Atmosféricos e Emissões Gasosas	19
3.9.	Tecnologias de Tratamento	20
3.9.1	Tratamento Químico	21
3.9.2	Tratamento Térmico.....	22
3.9.3	Tratamento Físico	23
3.10.	Possíveis Aplicações	24
3.10.1	Construção Civil.....	24
3.10.2	Emprego em Camadas de Pavimentação.....	25
3.10.3	Agricultura e Reabilitação de Solos	27
3.10.4	Recuperação de Elementos e Economia Circular	28
3.11.	Conclusão.....	30
	REFERÊNCIAS.....	31

1. INTRODUÇÃO

A produção constante de resíduos é um dos principais problemas ambientais, elevando a preocupação com sua reutilização, reciclagem e métodos apropriados de armazenamento (MOTA et al., 2009). É cada vez mais importante incentivar a conscientização de empresas, indústrias e da sociedade em geral sobre a importância de minimizar a produção desses resíduos. Levando em conta que sua formação é em grande parte inevitável, é essencial realizar estudos e pesquisas que permitam a reutilização desses materiais (JOHN, 2000). Neste contexto, o fosfogesso é um subproduto gerado na proporção de 4 a 5 toneladas para cada tonelada de ácido fosfórico produzida pela indústria de fertilizantes, o qual possui um promissor potencial de utilização (DIAS E LAJOLO, 2010). Porém, apenas cerca de 15% do fosfogesso produzido mundialmente é reciclado, enquanto a maior parte é descartada em aterros ou acumulada em grandes pilhas, muitas vezes sem proteção adequada. Isso resulta em riscos graves de contaminação ambiental e à saúde pública (MAZZILLI E SAUEIA, 1997).

A gestão inadequada do fosfogesso tem causado sérios impactos ambientais, como a contaminação de águas subterrâneas, a liberação de gases radioativos como o radônio e a degradação de solos em áreas próximas a depósitos de fosfogesso. Além disso, os impactos sobre a saúde humana, como exposição a metais pesados e elementos radioativos, têm despertado preocupações crescentes. Por outro lado, avanços tecnológicos e científicos vêm explorando formas de transformar o fosfogesso de um passivo ambiental em um recurso valioso para diversas indústrias e aplicações (PLIAKA E GAIDAJIS, 2002).

Na construção civil, o fosfogesso tem sido usado como material de base para pavimentos, estabilização de solos e produção de cimentos e tijolos. Estudos demonstraram que, quando adequadamente tratado, o fosfogesso pode melhorar as propriedades mecânicas de materiais de construção e reduzir custos de produção. Além disso, pesquisas recentes têm explorado a extração de elementos de terras raras do fosfogesso, essenciais para tecnologias modernas como baterias e turbinas eólicas (KULCZYCKA et al., 2016). O material também tem sido estudado para aplicações inovadoras, como adsorventes para tratamento de efluentes e compostos para armazenamento de energia térmica, consolidando-se como um recurso estratégico para a sustentabilidade e inovação tecnológica (KHAN et al., 2022).

Países como China, Brasil, Índia e Marrocos lideram a pesquisa e o desenvolvimento de aplicações do fosfogesso, devido à grande produção local e à necessidade de mitigar os impactos ambientais associados a esse resíduo. Colaborações internacionais e o uso de ferramentas analíticas, como estudos bibliométricos, têm identificado tendências emergentes e áreas prioritárias para o avanço das tecnologias de uso do fosfogesso. Contudo, o sucesso dessas iniciativas depende de políticas públicas eficazes, incentivos econômicos e a

conscientização das indústrias sobre as vantagens ambientais e econômicas do reaproveitamento do fosfogesso (WALSH E SCHENK E SCHMIDT, 2023).

Ainda assim, desafios significativos persistem, incluindo barreiras regulatórias, preocupações com radioatividade e a viabilidade técnica e econômica de certos processos de tratamento. Por exemplo, a neutralização da acidez do fosfogesso e a remoção de contaminantes, como metais pesados, ainda são etapas custosas que limitam a adoção em larga escala. A busca por soluções mais eficientes e econômicas continua sendo um objetivo central para maximizar o potencial desse resíduo e promover sua aceitação comercial em diversos setores (CUI et al., 2024).

Portanto, o fosfogesso apresenta um grande potencial para contribuir com a sustentabilidade ambiental e econômica global. Este trabalho explora as principais vertentes de reutilização do fosfogesso, analisando as tecnologias existentes, os desafios remanescentes e as perspectivas futuras para a valorização desse subproduto em diversos contextos industriais e ambientais. Ao integrar avanços científicos e esforços colaborativos, espera-se que o fosfogesso possa se tornar um recurso essencial para uma economia mais sustentável.

1.1. Objetivo geral

Em virtude do que foi apresentado, o objetivo do trabalho é explorar o potencial de reutilização sustentável do fosfogesso, analisando suas aplicações em setores como construção civil, agricultura e reabilitação ambiental. Busca-se identificar tecnologias viáveis e os desafios técnicos, econômicos e ambientais associados ao seu uso.

1.2. Objetivos específicos

- Analisar as propriedades físico-químicas do fosfogesso para entender suas limitações e potencial em diferentes aplicações industriais e ambientais;
- Avaliar as tecnologias de tratamento existentes, como neutralização química e processos térmicos, visando adaptar o fosfogesso para usos específicos, com foco na redução de contaminantes;
- Investigar aplicações do fosfogesso na construção civil, como material em cimentos, pavimentação e estabilização de solos, avaliando seu desempenho técnico e econômico;

2. METODOLOGIA

A metodologia consistiu em uma pesquisa de carácter exploratório e descritivo com base em uma revisão bibliográfica sistemática, além de análises comparativas de estudos

científicos publicados sobre o reaproveitamento do fosfogesso. O enfoque metodológico buscou compreender a composição, os impactos ambientais e as potencialidades de reutilização desse subproduto. Para isso, foram reunidos dados técnicos, experimentais e normativos que fundamentam a proposta de aplicação sustentável do material. O trabalho foi conduzido por meio da coleta, organização e interpretação de informações provenientes de fontes acadêmicas confiáveis. Foram realizadas as seguintes etapas:

- Seleção e leitura dos documentos: Identificação dos principais temas e conceitos relacionados ao fosfogesso;
- Análise comparativa: Comparação das aplicações propostas em cada estudo, avaliando viabilidade e impactos;
- Classificação das aplicações: Agrupamento das possibilidades de uso em categorias como construção, agricultura e extração de minerais;
- Identificação de lacunas: Determinação de áreas que necessitam de maior investimento em pesquisa;
- Proposta de soluções sustentáveis: Desenvolvimento de diretrizes para um uso mais abrangente e eficiente do material.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada a seguir contempla temas relacionados ao fosfogesso, evidenciando a escassez de informações disponíveis na literatura científica, especialmente no que se refere ao resíduo fosfogesso. Para a elaboração desta revisão foram consultados artigos técnicos, dissertações e teses de doutorado.

Nesta revisão, o estudo do fosfogesso é abordado desde seu processo de geração até as formas de disposição final. Foi dada ênfase em suas propriedades físico-químicas e em seu potencial radioativo, fator que limita sua utilização em alguns países devido às taxas de emissão de radônio associadas ao material. A partir dessa análise sobre o fosfogesso e com base em bibliografias recentes, é possível identificar semelhanças entre as suas propriedades e as propriedades do gesso. Essa equivalência evidencia o potencial do fosfogesso como alternativa viável ao gesso natural, sobretudo em aplicações na construção civil.

3.1. Composição Química do Fosfogesso.

O fosfogesso é composto principalmente por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), responsável por aproximadamente 90% de sua estrutura química. No entanto, sua composição varia conforme a origem da rocha fosfática, proveniente de depósitos sedimentares ou ígneos. Essas rochas podem conter impurezas como fósforo, flúor, metais pesados e elementos radioativos, como urânio e rádio. A presença dessas substâncias representa um desafio para seu uso seguro, exigindo tratamentos específicos para minimizar riscos ambientais e à saúde (BAO et al., 2024). A tabela 1 apresenta os principais componentes químicos do fosfogesso e suas concentrações típicas (CANUT, 2006).

Tabela 1. Composição química típica do fosfogesso

Componente	Concentração (%)
Sulfato de Cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	85-95
Fósforo (P_2O_5)	0,2-1,0
Flúor (F)	0,5-1,5
Matéria Orgânica	0,1-0,5
Metais pesados	<0,1
Elementos Radioativos	<0,01

Fonte: MAINA, KIEGIEL e ZAKRZEWSKA-KOŁTUNIEWICZ (2025).

Embora o cálcio e o sulfato confirmem propriedades úteis ao material, impurezas podem ser benéficas ou prejudiciais, dependendo da aplicação. O fósforo residual, por exemplo, pode ser vantajoso na agricultura, enquanto metais pesados, como cádmio e chumbo, podem restringir seu uso devido ao risco de contaminação (LIN et al., 2022). Além disso, sua acidez, causada por resíduos de ácido fosfórico e sulfúrico, pode ser neutralizada por processos químicos, melhorando sua segurança e funcionalidade.

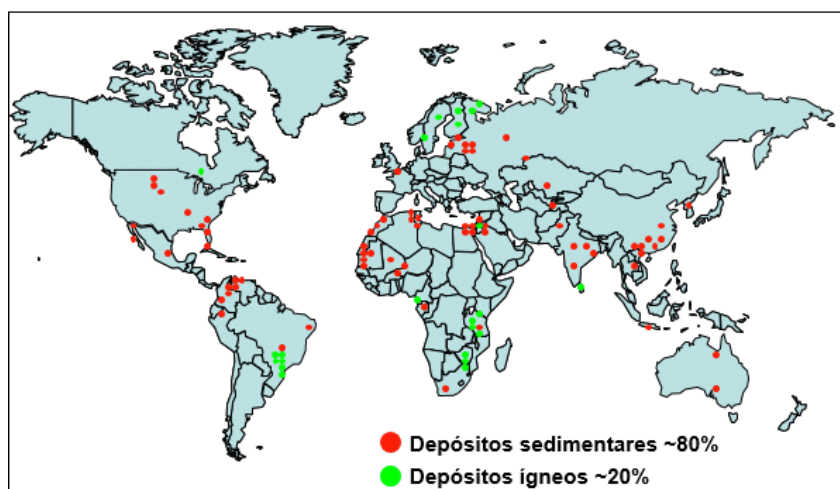
Canut (2006) ao estudar o fosfogesso proveniente de indústrias brasileiras identificou características físico-químicas semelhantes, com destaque para a heterogeneidade granulométrica e a presença de contaminantes. Esses resultados reforçam a necessidade de uma caracterização detalhada de cada lote de fosfogesso antes de seu reaproveitamento, pois variações significativas podem comprometer a performance em aplicações estruturais ou agrícolas. Por isso, conhecer profundamente sua composição é um passo indispensável para a definição de tratamentos adequados e a formulação de misturas otimizadas que aproveitem o

potencial do material com segurança e eficiência.

3.2. Distribuição Geográfica

A produção de fosfogesso está diretamente ligada à localização das reservas de fosfato, que são a matéria-prima essencial para a produção de ácido fosfórico (SILVA E GIULIETTI, 2010). Os principais países produtores incluem China, Marrocos, Estados Unidos, Brasil e Índia, com a China liderando tanto a produção de fosfato quanto a geração de fosfogesso como mostrado na Figura 1. Marrocos, que possui as maiores reservas mundiais de fosfato, é um dos principais exportadores globais, e sua produção gera milhões de toneladas de fosfogesso anualmente (DIAS E FERNANDES, 2006). No Brasil, os estados de Minas Gerais, Goiás, Sergipe e principalmente a Bacia Sedimentar do Araripe, região de fronteira dos estados do Piauí, Ceará e Pernambuco se destacam como os principais centros de produção, devido à presença de grandes jazidas de fosfato e à concentração de indústrias de fertilizantes (SAADAOUI et al., 2017).

Figura 1: Exploração mundial de rocha fosfatada.



Fonte: LEONE E RIGO (2020)

O fosfogesso é um subproduto gerado a partir do processamento químico de rochas fosfáticas, amplamente encontradas em solos ricos em minerais de origem sedimentar ou ígnea. Ele é encontrado em regiões onde predominam solos ricos em fosfatos, muitas vezes associados a formações sedimentares marinhas (VILLAVERDE, 2008). Esses solos, conhecidos como fosforitos, contêm altos teores de minerais fosfatados como a apatita, que são extraídos e processados quimicamente para a produção de ácido fosfórico (BILAL et al., 2023).

A concentração de fosfogesso também pode variar de acordo com as práticas industriais de cada país. Na china, por exemplo, o grande volume de produção é impulsionado pela combinação de uma vasta indústria química e uma alta demanda interna por fertilizantes (COSTA E SILVA, 2012). No Marrocos, o fosfogesso está frequentemente localizado em regiões costeiras devido à proximidade das minas de fosfato e dos portos utilizados para exportação. Nos Estados Unidos, os estados como Flórida e Louisiana concentram as maiores pilhas de fosfogesso, resultado de décadas de produção intensiva (HULL E BURNETT, 1996).

No Brasil, o fosfogesso é um resíduo normalmente produzido na indústria de ácido fosfórico e fertilizantes fosfatados. De maneira geral, estudos e relatórios técnicos apontam que a geração nacional atinge milhões de toneladas anualmente (DUARTE E FERNANDES, 2009). As maiores concentrações de pilhas e depósitos de fosfogesso, assim como é mostrado na figura 2, estão ligadas às grandes plantas de processamento, especialmente em Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul (TASCA, 2025).

Figura 2: Pilha de fosfogesso a céu aberto



Fonte: Reciclos (2016)

A justificativa geológica para essa localização industrial é clara: o Brasil extrai significativas reservas de rocha fosfática de origem ígnea (carbonatitos e outros depósitos associados) em regiões como Araxá (MG), Catalão (GO), entre outras (SILVA E GIULIETTI, 2010). Essas jazidas fornecem complexos integrados de beneficiamento e acidulação que, devido à sua composição química, produzem grandes quantidades de fosfogesso no local de processamento. Em outras palavras, a "origem" do resíduo está na distribuição das matérias-primas (rocha fosfática) e na escolha das indústrias — ao longo da história, as empresas têm instalado suas plantas próximas às minas ou nos eixos logísticos que atendem a essas minas, o que resulta em polos regionais de produção de fosfogesso (PLIAKA E GAIDAJIS, 2022).

Além da geologia, a demanda agrícola e a logística explicam a concentração do fosfogesso em determinados estados. Minas Gerais e São Paulo, por exemplo, atuam como centros devido à sua capacidade industrial e excelente conectividade rodoviária e ferroviária para atender aos principais polos agrícolas do Sudeste, Centro-Oeste e parte do Sul (DIAS E LAJOLO, 2010). Empresas que convertem resíduos em "gesso agrícola" realizam esse processo em locais com escala, pois isso simplifica a embalagem, certificação e distribuição do produto para diversos estados, diminuindo os custos de transporte por tonelada/quilômetro. A Mosaic, por exemplo, concentra uma parte de sua produção industrial em unidades como Uberaba (MG) e Cajati (SP), ilustrada na Figura 3, e declara que envia gesso para vários estados do Brasil. Essa estratégia justifica a presença significativa de pilhas e centros de expedição nessas regiões (GOMES, 2017).

Figura 3: Depósito de fosfogesso da empresa Mosaic em Cajati (SP)



Fonte: Brasil Mosaic (2025)

A filial da Mosaic em Uberaba abriga uma extensa operação de ácido fosfórico e, como resultado, uma das maiores pilhas/estruturas de fosfogesso da empresa no mundo, assunto amplamente divulgado em comunicados e na cobertura local. Nessa sede existem instalações de armazenamento (diques e "montanhas" de gesso), lagoas de contenção e uma logística preparada para o transporte rodoviário para diversos estados conforme mostrado na Figura 4. Além disso, a Mosaic certificou uma parte do seu gesso para uso agrícola/orgânico, convertendo um passivo em um produto comercial (gesso agrícola). Além disso, essa unidade tem atraído colaborações para pesquisa: existem acordos para investigar a extração de elementos raros do fosfogesso e estudos técnicos avaliando aplicações do material (como a estabilização de solos). Isso demonstra como a empresa em Uberaba une escala, possibilidade de valorização e pesquisa aplicada (MOSAIC BRASIL, 2022).

Figura 4: Depósito de fosfogesso da empresa Mosaic em Uberaba (MG).



Fonte: Mosaic Brasil (2022)

Dado o exposto, nota-se que a distribuição geográfica do fosfogesso no Brasil reflete um eixo triplo: (1) geologia - local de extração da rocha fosfática; (2) indústria - local de instalação do parque de processamento/acidulação; e (3) mercado/logística - local onde é viável agregar o produto e enviá-lo para as lavouras. Esse arranjo gera desafios ambientais como: estoques volumosos, necessidade de impermeabilização, controle de lixiviação e preocupação com radionuclídeos/impurezas. Porém, também promove oportunidades de economia circular, como uso agrícola, aplicações industriais e pesquisa para recuperação de elementos valiosos. Em suma, a abundância de fosfogesso em Minas Gerais e nos polos mencionados é resultado da combinação entre recursos minerais, histórico industrial e acesso logístico (CHERNYSH et al., 2021).

3.3. Propriedades Físico-Químicas Relevantes para Aplicação

Para avaliar a viabilidade do fosfogesso em diversas aplicações industriais, agrícolas ou ambientais, é preciso considerar suas propriedades físico-químicas. A granulometria, a densidade, o teor de umidade, o pH, a resistência mecânica, a absorção de água e a área superficial específica são alguns dos principais parâmetros analisados (CANUT, 2006). De modo geral, o fosfogesso possui uma textura fina, úmida e quebradiça, com partículas que vão do silte à areia fina. Essa característica facilita sua compactação, mas reduz sua resistência mecânica quando usado isoladamente. Conforme demonstrado por Amrani et al. (2020), o fosfogesso marroquino possui baixa densidade seca (aproximadamente $14,8 \text{ kN/m}^3$) e alta umidade natural (47%), o que exige secagem ou estabilização antes de sua utilização em camadas estruturais.

Ademais, o pH altamente ácido, variando entre 2 e 3, constitui uma das principais limitações para a utilização direta do fosfogesso em diversas aplicações. Essa acidez é resultado da presença de resíduos de ácidos sulfúrico e fosfórico, típicos do processo

industrial de fabricação do ácido fosfórico (SILVA E GIULIETTI, 2010). Como consequência, a interação do material com o ambiente pode produzir lixiviados ácidos, o que aumenta a mobilização de metais pesados e substâncias tóxicas. Canut (2006) conduziu estudos que revelaram diferenças notáveis nas propriedades físico-químicas do gesso natural em comparação com o fosfogesso. Este último se mostrou mais poroso, mais ácido e com menor resistência mecânica, particularmente em corpos de prova compactados com altos níveis de substituição.

Em contrapartida, algumas dessas características podem ser utilizadas de maneira positiva em determinados contextos. Por exemplo, a alta concentração de cálcio confere ao fosfogesso potencial cimentício quando combinado com outros aglomerantes, como cal ou cinzas volantes (VARGAS, 2006). Sua estrutura delgada e porosa pode aumentar a reatividade em processos de estabilização ou ao ser utilizada como aditivo em composições de concreto. Portanto, as propriedades físico-químicas do fosfogesso devem ser analisadas individualmente, a fim de determinar tratamentos adequados e identificar as aplicações mais compatíveis para cada tipo de resíduo (ZUQUETTI GONÇALVES et al., 2020).

3.4. Produção do ácido fosfórico

A produção industrial de ácido fosfórico pelo processo úmido (wet-process) tem início com a preparação da matéria-prima. A rocha fosfática passa por processos de cominuição (britagem e moagem) e classificação para diminuir o tamanho das partículas e eliminar impurezas grosseiras. Esse pré-tratamento é fundamental, pois a reatividade do mineral (especialmente $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) em relação ao ácido sulfúrico depende da composição e da superfície específica da rocha. Partículas menores e uniformemente misturadas asseguram uma reação mais eficiente e controlável no reator. Britadores, moinhos de bolas e ciclones/classificadores são equipamentos comuns nessa fase, pois preparam o alimentador para o digestor ácido (GERALDO et al, 2021).

A digestão ácida é a etapa principal: a rocha fosfática moída é combinada com ácido sulfúrico em reatores contínuos ou em batelada, sob condições controladas de temperatura e relação sólido/líquido. Quimicamente, o sulfato reage com o fosfato, resultando na liberação de ácido fosfórico em solução e na formação de sulfato de cálcio hidratado (fosfogesso) como sólido precipitado (ROUT et al, 2024). De acordo com Hull & Burnett (1996) e Lapidou-Loureiro & Nascimento (2009), o processo químico para a obtenção do resíduo fosfogesso é dado pela equação 1.



O sistema de mistura e transferência de calor é projetado com o objetivo de otimizar a conversão e reduzir a formação de fases indesejadas. Isso envolve o controle da temperatura, do tempo de residência, da granulometria e da razão ácido/rocha para maximizar a produção de H_3PO_4 . Além disso, é necessário controlar a cristalinidade e o tamanho do cristal de gesso, que afetarão a separação sólido-líquido que ocorrerá em seguida (YUAN et al, 2024).

A separação sólido-líquido, etapa em que o fosfogesso é eliminado da solução de ácido fosfórico por meio de filtração ou decantação, acontece após a digestão. As unidades de filtração industrial, como filtros de rosca, filtros prensa ou filtros rotativos a vácuo, são projetadas para lidar com altas taxas de geração de sólidos e permitir a lavagem do leito de gesso, diminuindo as impurezas solúveis remanescentes, como sulfato residual, metais e radionuclídeos. O ácido fosfórico bruto, que é o filtrado, passa pelos processos de purificação e concentração. O sólido lavado, conhecido como fosfogesso, é submetido a espessamento, desaguamento e, em seguida, é encaminhado para empilhamento ou valorização (AWAD et al, 2024).

3.5. Classificação legal e normativa do fosfogesso

A classificação do fosfogesso como resíduo varia entre países e está diretamente relacionada à sua composição química, ao potencial radioativo e ao impacto ambiental. Na União Europeia, esse material é inicialmente considerado um resíduo perigoso devido à possibilidade de conter elementos tóxicos ou radioativos, como o rádio-226 e o urânio-238 (CANUT, 2006). Contudo, a legislação permite sua reclassificação como resíduo não perigoso desde que sejam comprovados, por meio de testes específicos, níveis seguros de emissões e de lixiviação. Essa abordagem flexível tem estimulado pesquisas que buscam caracterizar o material de forma precisa e propor rotas seguras de reaproveitamento (CHAVES et al., 2001).

No Brasil, embora não exista uma norma técnica específica para a aplicação do fosfogesso em materiais de construção, de acordo com a ABNT NBR 10004 ele pode ser classificado como resíduo sólido da classe II, não perigoso (TASCA, 2025). Antes de sua utilização em larga escala, a legislação brasileira exige estudos de caracterização, testes de lixiviação e solubilização, além de análises radiológicas. A ausência de regulamentação clara no país, especialmente no que se refere ao uso do fosfogesso como alternativa ao gesso natural, dificulta sua inserção no mercado formal de materiais de construção, apesar dos resultados laboratoriais promissores (NISTI, 2016).

Essa lacuna jurídica impacta tanto a comercialização do fosfogesso beneficiado quanto a criação de políticas públicas voltadas para o incentivo à sua reutilização. Para garantir segurança em seu uso, simplificar processos de licenciamento ambiental e aumentar o

interesse da indústria, é fundamental padronizar normas técnicas com critérios objetivos de avaliação e controle (LOMBA, 2019). A harmonização das legislações ambientais e industriais, em âmbito nacional e internacional, constitui uma estratégia essencial para consolidar o fosfogesso como um insumo viável dentro dos princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável (FERREIRA, 2010).

3.6. Potencial Radioativo e Seus Impactos Ambientais

Uma das principais preocupações relacionadas à reutilização do fosfogesso, sobretudo em áreas urbanas e agrícolas, está ligada ao seu potencial radioativo. Esse resíduo é originado da rocha fosfática, que contém em sua composição radionuclídeos como urânio-238, tório-232 e rádio-226 (FERREIRA, 2020). Após o processo de produção do ácido fosfórico, parte desses elementos permanece no fosfogesso. As concentrações desses radionuclídeos variam de acordo com a origem geológica da rocha e o método de fabricação, podendo ultrapassar limites considerados seguros para a exposição humana. Por isso, a avaliação radiológica é considerada fundamental antes de autorizar qualquer aplicação em larga escala (DA SILVEIRA, 2013).

Estudos realizados em diferentes países indicam que os níveis de emissão de radônio-222, um gás radioativo proveniente da desintegração do rádio-226, podem ser elevados em áreas de armazenamento do fosfogesso (FERREIRA, 2020). Em alguns locais, como em regiões da Espanha e do Chipre, observou-se aumento significativo da radiação de fundo próximo a pilhas do material, o que levou à adoção de medidas restritivas e, em certos casos, à proibição de seu uso. Esse cenário reforça a necessidade de controle rigoroso no manuseio e na aplicação do fosfogesso, especialmente em zonas habitadas ou agrícolas, onde pode ocorrer contato direto com pessoas e animais.

Apesar das limitações apontadas, há um entendimento crescente de que, com monitoramento radiológico adequado e aplicação de técnicas de controle, o fosfogesso pode ser reutilizado de forma segura. Em alguns países, pesquisas sugerem que a radioatividade do material pode ser considerada relativamente baixa, embora ainda exija acompanhamento contínuo. A definição de limites legais para os radionuclídeos e a padronização dos métodos de medição são fatores essenciais para garantir a utilização segura do fosfogesso e oferecer respaldo jurídico ao seu reaproveitamento (TASCA, 2025).

3.7. Contaminação de Solos e Recursos Hídricos

O acúmulo inadequado de fosfogesso em grandes pilhas a céu aberto tem gerado impactos ambientais significativos, sobretudo na contaminação de solos e de águas superficiais e subterrâneas. Quando esse resíduo entra em contato com a água da chuva ou com a umidade do solo, pode liberar compostos potencialmente tóxicos, como flúor, fósforo, metais pesados e ácidos residuais (PINTO, 2007). A acidez natural do fosfogesso facilita a solubilização dessas substâncias, permitindo que elas atinjam o lençol freático ou sejam carregadas para corpos d'água superficiais. Em diferentes países já foram registrados casos de infiltração de lixiviados provenientes de depósitos de fosfogesso, que comprometeram a qualidade da água potável e dos solos agrícolas (SILVA E GIULIETTI, 2010).

No Brasil, a região de Cubatão enfrentou contaminação de sedimentos por elementos como bário, tório e terras raras, decorrentes de pilhas de fosfogesso (CALADO, 2008). Na Tunísia, a costa de Gabès sofreu forte acidificação e poluição por metais pesados em razão do descarte de resíduos no mar, o que impactou a fauna aquática e a atividade pesqueira. Esses exemplos evidenciam o potencial poluidor do fosfogesso quando não há controle adequado em seu armazenamento ou tratamento prévio. Em muitos casos, os sistemas de contenção são inexistentes ou ineficientes, ampliando o risco de contaminação de áreas vizinhas e dos recursos hídricos (DE ARAÚJO E FERNANDES, 2013).

Por outro lado, avanços em pesquisas têm mostrado que a estabilização química do fosfogesso com o uso de aditivos, como cal, argila, cinzas volantes e ligantes hidráulicos, pode reduzir significativamente sua capacidade de lixiviação (METOGO, 2015). Ensaios de lixiviação apontam que misturas formuladas com fosfogesso estabilizado podem atender aos padrões de segurança ambiental. Isso demonstra que a contaminação não é uma característica intrínseca do material, mas consequência de um manejo inadequado. Dessa forma, a engenharia de materiais oferece soluções eficazes para minimizar riscos e promover o uso ambientalmente seguro desse subproduto (NISTI, 2016).

3.8. Impactos Atmosféricos e Emissões Gasosas

O fosfogesso pode gerar impactos negativos também no meio atmosférico, além de afetar o solo e a água. O transporte de partículas finas pelo vento, muitas vezes tóxicas ou radioativas, é favorecido pela presença de grandes pilhas de armazenamento expostas às intempéries e a correntes de ar intensas (TAYIBI et al., 2009). Estudos realizados em diferentes regiões já identificaram a liberação de gases e partículas contaminadas por

fluoretos, óxidos de ferro e substâncias radioativas voláteis, como o radônio (^{222}Rn). A exposição da população a essas emissões representa um risco à saúde, especialmente em áreas urbanas localizadas próximas a depósitos de grande porte (BONFIM, 2018).

Em algumas localidades, verificou-se que a concentração de gás fluorídrico (HF) no ar ambiente alcançou valores muito acima dos níveis considerados seguros. O radônio, gás radioativo e inodoro resultante da desintegração do rádio-226 presente no fosfogesso, também foi detectado em concentrações superiores ao limite aceitável, com doses capazes de ultrapassar em várias vezes a média natural de exposição anual à radiação (CATÃO, 2023). Esses dados evidenciam que o risco não está apenas associado ao uso do fosfogesso em aplicações diretas, mas também ao seu armazenamento sem medidas adequadas de contenção ou cobertura.

Apesar da gravidade desses impactos atmosféricos, já existem soluções técnicas capazes de reduzir significativamente o problema. Entre elas estão a cobertura das pilhas com materiais inertes, a encapsulação do fosfogesso com polímeros e a criação de barreiras vegetais ao redor das áreas de estocagem, todas estratégias que reduzem a emissão de poeiras e gases (PINTO, 2007). Outra possibilidade é a utilização do fosfogesso estabilizado em materiais de construção, como bases para forros e divisórias internas, desde que haja rigoroso controle da liberação de compostos voláteis. Assim, o monitoramento contínuo da qualidade do ar e o gerenciamento das emissões atmosféricas constituem requisitos fundamentais para garantir o uso seguro e ambientalmente sustentável desse subproduto industrial (CANUT, 2006).

3.9. Tecnologias de Tratamento

O uso seguro do fosfogesso depende, em grande medida, da aplicação de tratamentos voltados para sua neutralização química e estabilização física. Esses tratamentos têm como principais objetivos reduzir a acidez do material, diminuir sua solubilidade, imobilizar contaminantes e melhorar sua resistência mecânica (OLIVEIRA, 2005). Entre as técnicas mais comuns estão a adição de aditivos alcalinos, como cal hidratada, cimento Portland, cinzas volantes, escórias de alto-forno e até mesmo solos argilosos. Essas combinações favorecem reações pozolânicas e processos de precipitação, que estabilizam o fosfogesso e permitem sua utilização em diferentes aplicações estruturais e ambientais (ZHANG et al., 2024).

A escolha do tratamento adequado deve considerar a finalidade do uso, as características do lote de fosfogesso e os critérios ambientais estabelecidos. Em aplicações agrícolas, a prioridade é reduzir a acidez e eliminar metais pesados solúveis; já em

construções civis, o foco está na resistência mecânica e na durabilidade (BLUM, 2011). Independentemente do caminho escolhido, os tratamentos são fundamentais para transformar o fosfogesso de um passivo ambiental em um recurso de valor estratégico. Os avanços alcançados na engenharia de materiais e na química ambiental têm ampliado o número de técnicas disponíveis, tornando cada vez mais viável seu aproveitamento de forma técnica e ambientalmente segura.

3.9.1 Tratamento Químico

Uma das formas mais eficientes de melhorar as propriedades ambientais e reativas do fosfogesso é por meio do tratamento químico. Essa abordagem busca neutralizar a acidez, imobilizar metais pesados e radionuclídeos, além de aumentar a reatividade do material quando combinado com aglomerantes para diferentes aplicações, como estabilização de solos, produção de materiais cimentícios ou uso agrícola (NISTI, 2016). O processo geralmente envolve a incorporação de compostos alcalinos, como cal hidratada, cimento Portland, cinzas volantes ou escórias industriais. Esses aditivos promovem reações de neutralização e complexação, reduzindo a acidez e convertendo contaminantes em formas de menor solubilidade (LUZ et al., 2005).

Misturas de fosfogesso com aditivos adequados já demonstraram estabilidade geoquímica, baixa taxa de lixiviação, maior resistência mecânica e boa durabilidade, inclusive em condições de imersão (METOGO, 2015). Isso mostra que o tratamento químico não apenas melhora as características ambientais do resíduo, como também amplia seu potencial de aplicação em diferentes setores. A interação entre o sulfato de cálcio e os aditivos alcalinos favorece a formação de produtos cimentícios secundários, como etringita e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que conferem rigidez e coesão ao material (LEÃO, 2019).

Uma vantagem importante desse tratamento é sua flexibilidade, pois as proporções dos reagentes podem ser ajustadas conforme a composição do fosfogesso, permitindo adaptação a diferentes contextos. No entanto, essa prática requer planejamento técnico para evitar a geração de subprodutos indesejáveis e deve ser acompanhada por ensaios de lixiviação, análises de pH, condutividade elétrica e concentrações iônicas. Além disso, a viabilidade econômica em larga escala depende diretamente do custo e da disponibilidade dos reagentes (SILVA E GIULIETTI, 2010).

3.9.2 Tratamento Térmico

O tratamento térmico do fosfogesso consiste em submeter o material a temperaturas elevadas para modificar sua estrutura cristalina, reduzir a umidade, volatilizar compostos orgânicos ou mesmo degradar impurezas químicas (PENA, s.d.). Essa técnica é bastante utilizada na produção de gesso beta (semi-hidratado), um material mais reativo que pode atuar como aglomerante na construção civil. Quando aquecido entre 130 °C e 180 °C, o fosfogesso perde parte de sua água de hidratação, transformando-se em hemidrato de sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), que possui propriedades aglutinantes adequadas para uso em placas, argamassas e moldagens (SILVA et al., 2023).

A calcinação do fosfogesso possibilita sua conversão em um produto com características físico-químicas semelhantes às do gesso natural, o que torna viável sua aplicação em materiais de construção (CANUT, 2006). Entretanto, é necessário controlar cuidadosamente a temperatura e o tempo de exposição para evitar a formação de anidrita, que apresenta baixa reatividade em comparação ao hemidrato. Além disso, o tratamento térmico contribui para a eliminação de compostos orgânicos residuais e pode reduzir parcialmente poluentes voláteis, como fluoretos e matéria orgânica (SILVA E GIULIETTI, 2010).

Apesar de suas vantagens, esse método apresenta limitações devido ao alto consumo energético e à necessidade de equipamentos específicos, como fornos rotativos ou leitos fluidizados (TASCA, 2025). Esses fatores podem inviabilizar sua aplicação em larga escala, especialmente quando o valor de mercado do produto final não compensa os custos envolvidos. Outro aspecto crítico é que, em casos de fosfogesso contendo elementos radioativos, o aquecimento pode intensificar a liberação de gases como o radônio, exigindo sistemas adequados de exaustão e filtragem para garantir segurança ocupacional e ambiental (FERREIRA, 2020).

Quando corretamente aplicado, o tratamento térmico não apenas possibilita o uso do fosfogesso como aglomerante, mas também amplia suas possibilidades de aproveitamento em produtos de maior valor agregado, como moldes cerâmicos, drywall, ladrilhos e blocos com propriedades térmicas otimizadas. Dessa forma, essa técnica representa uma alternativa sólida do ponto de vista técnico, embora dependa de uma análise econômica detalhada e de rígido controle ambiental para sua implementação (PENA, s.d.).

3.9.3 Tratamento Físico

O tratamento físico do fosfogesso é realizado por meio de processos que não envolvem transformações químicas ou térmicas, mas sim intervenções de caráter mecânico e operacional, com o objetivo de aprimorar suas propriedades físicas e facilitar o manuseio, transporte e aplicação (SILVA E GIULIETTI, 2010). Entre os métodos mais comuns estão a secagem natural ou artificial para redução da umidade, o peneiramento para padronização granulométrica, a compactação e a homogeneização. Esses procedimentos contribuem para diminuir o volume do material, melhorar sua trabalhabilidade e prepará-lo para etapas posteriores de beneficiamento ou para aplicações diretas (DEGIRMENCI E OKUCU E TURABI, 2007).

A secagem do fosfogesso desempenha papel essencial, sobretudo quando se pretende utilizá-lo em composições cimentícias ou como alternativa ao gesso natural. O material, ao sair das unidades industriais, pode apresentar até 50% de umidade, o que compromete sua reatividade e estabilidade física (PLIAKA E GAIDAJIS, 2022). Quando devidamente seco, o fosfogesso demonstra desempenho satisfatório em aplicações como placas para forros, oferecendo tempo de pega mais uniforme e resistência mecânica comparável à do gesso comercial, desde que sejam observados parâmetros adequados de dosagem. Além disso, a secagem garante melhores condições de armazenamento, evitando a deterioração causada por microrganismos (AWAD et al., 2024).

Outro tratamento físico de grande relevância é o peneiramento, que tem como finalidade eliminar partículas mais grosseiras ou impurezas, assegurando maior uniformidade granulométrica (TANG E PURI, 2004). Isso se mostra essencial em usos que exigem misturas homogêneas, como na estabilização de solos ou na fabricação de blocos e placas. Já a compactação contribui para aumentar a densidade e a coesão do material, característica especialmente aproveitada em obras de engenharia geotécnica, nas quais o fosfogesso é empregado como material de enchimento ou base estrutural (ARCHIBONG et al., 2020).

Apesar de não provocarem mudanças em sua composição química, os tratamentos físicos assumem papel estratégico na valorização do fosfogesso (CHERNYSH et al., 2021). Funcionam como etapas preliminares de beneficiamento e, em muitos casos, já são suficientes para determinadas aplicações de menor risco ambiental, como em obras de infraestrutura não críticas ou em coberturas de aterros. Por apresentarem baixo custo e facilidade de execução, esses métodos configuram alternativas fundamentais em qualquer plano de reaproveitamento do fosfogesso (GUAN et al., 2024).

3.10. Possíveis Aplicações

3.10.1 Construção Civil

O emprego do fosfogesso como substituto parcial ou integral do gesso natural na construção civil vem sendo investigado há mais de duas décadas, especialmente no contexto brasileiro (LOPES, s.d.). Ensaio físico-mecânicos realizados em placas de forro produzidas com diferentes proporções de substituição demonstraram que a incorporação de 50% de fosfogesso pode resultar em desempenho satisfatório, com resistência mecânica adequada, tempo de pega apropriado e boa aderência, desde que o material passe previamente por etapas de secagem e beneficiamento (GUEDRI et al., 2023). Esses resultados comprovam a viabilidade técnica do seu aproveitamento na produção de componentes construtivos não estruturais.

Além das propriedades técnicas, a utilização do fosfogesso pode gerar expressiva economia de custos para o setor da construção. A exploração e o transporte do gesso natural, concentrado em polos específicos do Nordeste, encarecem o preço do insumo em diversas regiões do país (CHAVES et al., 2021). Em contrapartida, o fosfogesso é produzido em grandes quantidades em áreas industriais próximas a centros urbanos do Sudeste e Sul, o que proporciona vantagens logísticas e financeiras, além de reduzir os impactos associados à mineração de gipsita (SILVA E GIULIETTI, 2010).

O uso do fosfogesso na construção civil apresenta-se como uma alternativa sustentável e economicamente viável, especialmente como substituto parcial ou total do gesso natural. Este subproduto da indústria de fertilizantes, composto majoritariamente por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), possui propriedades semelhantes ao gesso natural, tornando-o adequado para diversas aplicações (CALDERÓN-MORALES et al., 2021). Entre suas principais utilizações destacam-se a fabricação de artefatos como placas de forro, divisórias, molduras decorativas e blocos para alvenaria conforme a figura 5. Além disso, o fosfogesso pode ser utilizado como material de revestimento de paredes, oferecendo acabamento de alta qualidade e características térmicas e acústicas satisfatórias. A substituição do gesso natural pelo fosfogesso reduz significativamente a extração de recursos minerais e minimiza os custos de produção, contribuindo para a preservação ambiental e a sustentabilidade da construção civil (AWAD et al., 2024).

Figura 6: Fosfogesso em pavimentação



Fonte: PPLWARE (2025)

Além das propriedades mecânicas, o uso combinado de fosfogesso com materiais alcalinos contribui para neutralizar a acidez e reduzir a mobilização de contaminantes, garantindo maior estabilidade ambiental (ZMEMLA et al., 2022). Ensaios de lixiviação mostram que a adição de cal e cinzas volantes resulta em excelente estabilidade volumétrica e baixa solubilidade de poluentes. Essa abordagem não apenas amplia a segurança do material em contato com o solo, mas também permite o aproveitamento conjunto de diferentes resíduos industriais, fortalecendo o conceito de economia circular aplicado ao setor de infraestrutura (MESKINI et al., 2021).

No contexto brasileiro, essa aplicação ainda se encontra em caráter experimental, mas já existem indícios da viabilidade do fosfogesso em argamassas de regularização e como material de enchimento (CANUT, 2006). A localização estratégica de polos industriais produtores de fertilizantes próximos a áreas urbanas com déficit de infraestrutura viária torna essa alternativa ainda mais relevante. A incorporação do fosfogesso em tecnologias de estabilização de solos compactados e em camadas de pavimentação pode oferecer não apenas soluções técnicas eficientes, mas também benefícios sociais, ao viabilizar obras públicas de baixo custo e com menor impacto ambiental (MEN et al., 2022).

Estudos indicam que, após tratamentos que neutralizam sua acidez e controlam possíveis contaminações, o fosfogesso proporciona melhorias na compactação, elasticidade e capacidade de suporte das misturas, tornando-se uma solução eficiente e econômica para obras rodoviárias. Além disso, ele pode ser aplicado em aterros de rodovias, desde que limitado a alturas específicas e protegido contra a infiltração de água, para evitar lixiviação de contaminantes. O uso do fosfogesso nesse setor não só promove a valorização de resíduos industriais, como também contribui para a sustentabilidade de projetos de infraestrutura, ao reduzir a demanda por materiais naturais e mitigar impactos ambientais (AMRANI et al.,

2020).

3.10.3 Agricultura e Reabilitação de Solos

A aplicação do fosfogesso na agricultura é uma das rotas mais estudadas e consolidadas para o aproveitamento desse subproduto, especialmente como corretivo de solos ácidos e fonte de cálcio e enxofre para plantas. O fosfogesso atua na melhoria da estrutura do solo, promove a diminuição da toxicidade por alumínio em subsuperfície e aumenta a disponibilidade de nutrientes essenciais ao crescimento vegetal. Pliaka & Gaidajis (2022) destacam que, quando corretamente aplicado, o fosfogesso pode melhorar significativamente a produtividade agrícola em solos tropicais e subtropicais, como os encontrados no Brasil. Além disso, por ser mais solúvel que o calcário, seu efeito alcança camadas mais profundas do solo, o que é especialmente vantajoso para culturas de raízes mais longas, como a cana-de-açúcar e o milho.

Contudo, o uso agrícola do fosfogesso exige cuidados específicos. Por ser um resíduo industrial, o material pode conter impurezas como metais pesados (Cd, Pb, Hg), fluoretos e até radionuclídeos, cuja presença precisa ser rigorosamente controlada para evitar impactos sobre o solo, as águas subterrâneas e, indiretamente, sobre a cadeia alimentar (CHERNYSH et al., 2021). No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estabelece limites de concentração para elementos radioativos presentes no fosfogesso, e a aplicação agrícola só é permitida mediante análise técnica que comprove a conformidade com tais limites. Canut (2006) já mencionava que, apesar da radioatividade do fosfogesso brasileiro ser considerada baixa, a sua aplicação em larga escala só é viável com suporte legal e técnico adequados.

Além da função agrícola, o fosfogesso também tem potencial como material de reabilitação de áreas degradadas, como minas exauridas e solos contaminados. A capacidade do fosfogesso de reestruturar fisicamente o solo, neutralizar a acidez e fornecer elementos minerais o torna um candidato promissor para recomposição de paisagens impactadas (PLIAKA E GAIDAJIS, 2022). Em regiões com histórico de mineração de bauxita, carvão ou fosfato, sua aplicação pode contribuir para a recuperação da fertilidade e da estrutura do solo, facilitando o revegetamento e o retorno da biodiversidade. Essa abordagem multifuncional amplia o escopo sustentável do fosfogesso, consolidando seu papel como uma ferramenta estratégica na gestão ambiental integrada (MAINA E KIEGIEL E ZAKRZEWSKA-KOŁTUNIEWICZ, 2025)

O fosfogesso é amplamente reconhecido como um insumo agrícola de alto potencial como pode ser observado na figura 7, atuando como corretivo de solo e fonte de nutrientes essenciais, como cálcio e enxofre. Em solos ácidos, sua aplicação contribui para a

neutralização da toxicidade do alumínio, um elemento que limita o desenvolvimento radicular (PLIAKA E GAIDAJIS, 2022). Ao melhorar a estrutura do solo, o fosfogesso promove maior infiltração e retenção de água, além de otimizar o ambiente para o crescimento das raízes, especialmente em sistemas agrícolas intensivos. Sua composição química também facilita a liberação de fósforo no solo, um nutriente crucial para o desenvolvimento das plantas, aumentando a eficiência no uso de fertilizantes. Isso é especialmente valioso em regiões onde o solo apresenta limitações físicas e químicas, como os solos tropicais altamente intemperizados encontrados no Brasil (BELLO et al., 2021).

Figura 7: Fosfogesso como gesso agrícola



G1 (2022)

3.10.4 Recuperação de Elementos e Economia Circular

A recuperação de elementos de valor contidos no fosfogesso representa uma fronteira inovadora e promissora para sua valorização industrial. Entre os elementos presentes estão as terras raras (como lantânio, cério, etc), além de metais como estrôncio, bário e até mesmo o urânio, que podem ter aplicações nas indústrias eletrônica, metalúrgica, química e energética. Pliaka & Gaidajis (2022) destacam que a recuperação desses elementos não apenas amplia a rentabilidade do reaproveitamento do fosfogesso, como também reduz a necessidade de mineração primária, o que é coerente com os princípios da economia circular e da gestão eficiente de recursos não renováveis.

Embora ainda seja incipiente em termos comerciais, diversos estudos laboratoriais têm proposto técnicas químicas e hidrometalúrgicas para a extração seletiva desses elementos.

Processos envolvendo lixiviação ácida controlada, troca iônica e precipitação seletiva têm apresentado bons resultados na separação de terras raras e outros metais (MUKABA et al., 2021). O desafio está em desenvolver rotas de extração que sejam tecnicamente eficientes, ambientalmente seguras e economicamente viáveis, considerando a grande variabilidade da composição do fosfogesso e a necessidade de tratamento prévio (CHERNYSH et al., 2021). Além disso, os resíduos gerados nesses processos também precisam ser adequadamente gerenciados para evitar novos passivos ambientais.

A integração dessas rotas de recuperação com outras aplicações do fosfogesso (como sua estabilização para uso na construção ou na agricultura) pode formar cadeias produtivas mais completas e sustentáveis (TASCA, 2025) como mostra a figura 8. Por exemplo, após a extração de metais de interesse, o material remanescente pode ainda ser utilizado como insumo secundário, desde que sua segurança seja garantida. Essa lógica de aproveitamento múltiplo promove a máxima utilização do resíduo e reduz sua destinação a aterros ou pilhas permanentes. Trabalhos como os de Amrani et al. (2020) apontam para a necessidade de pesquisas multidisciplinares e parcerias entre setor industrial, acadêmico e governamental para viabilizar essas inovações, que têm potencial de transformar o fosfogesso em um ativo estratégico para a indústria verde.

Figura 8: Blocos restaurados por fosfogesso



Fonte: INOVAÇÃO TECNOLÓGICA (2008)

Na economia circular, o fosfogesso desempenha um papel essencial ao ser reintegrado em processos produtivos como uma matéria-prima secundária, substituindo recursos naturais extraídos e contribuindo para o fechamento dos ciclos industriais. O reaproveitamento desse material reduz significativamente a necessidade de armazenamento em pilhas de resíduos, que ocupam grandes áreas de terreno e podem representar riscos ambientais e de saúde pública. Iniciativas que utilizam fosfogesso para a fabricação de materiais de construção, pavimentação, ou mesmo em soluções agrícolas, são exemplos de como os resíduos podem ser transformados em recursos valiosos, alinhados aos princípios da circularidade (CANUT,

2006).

No contexto da sustentabilidade, a aplicação do fosfogesso reduz emissões de gases de efeito estufa ao minimizar a dependência de processos intensivos em carbono, como a mineração de gesso natural (HAO et al., 2005). Além disso, sua reutilização colabora para o cumprimento de metas globais de desenvolvimento sustentável, como a redução de resíduos e a promoção de práticas industriais responsáveis. Para maximizar seus benefícios, é essencial o desenvolvimento de tecnologias que tratem as impurezas do fosfogesso, como metais pesados e elementos radioativos, garantindo que seu uso seja seguro e viável (GUAN et al., 2024).

3.11. Conclusão

A pesquisa realizada possibilitou uma compreensão ampla da importância do fosfogesso, tanto como um desafio ambiental quanto como uma oportunidade estratégica para a sustentabilidade na indústria. O material, produzido em grande quantidade como subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados, possui uma composição complexa e pode ser prejudicial ao meio ambiente devido à presença de metais pesados e elementos radioativos. No entanto, as análises mostraram que, quando adequadamente tratado e controlado, o fosfogesso pode ser convertido em um insumo de alto valor agregado, que pode ser usado de forma segura e eficaz em várias áreas da engenharia, agricultura e até na recuperação de recursos minerais. A falta de normas técnicas específicas ainda constitui um obstáculo para sua utilização em grande escala, particularmente no Brasil, onde há um alto potencial de produção. Estabelecer diretrizes claras em relação aos limites radiológicos, métodos de tratamento e padrões de qualidade pode assegurar a segurança e aumentar a aceitação do material no mercado. Ademais, é fundamental incentivar pesquisas e estabelecer colaborações entre universidades, indústrias e entidades ambientais para consolidar o fosfogesso como um recurso sustentável e economicamente viável. Os estudos também evidenciaram o crescente interesse na recuperação de elementos de terras raras e metais de valor a partir do fosfogesso, o que amplia seu potencial econômico e estratégico. O fosfogesso se insere como um vetor importante na transição para modelos industriais mais limpos e circulares, que priorizam o aproveitamento integral dos resíduos. Em conclusão, a combinação de progressos científicos, políticas ambientais apropriadas e conscientização do setor industrial pode transformar um desafio histórico em uma solução inovadora.

REFERÊNCIAS

AAGLI, Ali et al. Conversion of phosphogypsum to potassium sulfate: Part I. The effect of temperature on the solubility of calcium sulfate in concentrated aqueous chloride solutions. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 82, n. 2, p. 395-399, 2005.

AMRANI, Mustapha et al. Phosphogypsum recycling: New horizons for a more sustainable road material application. **Journal of Building Engineering**, v. 30, p. 101267, 2020.

ARCHIBONG, G. A. et al. A review of the principles and methods of soil stabilization. **International Journal of Advanced Academic Research| Sciences**, v. 6, n. 3, p. 2488-9849, 2020.

AREMU, GABRIEL OLUWATIMILEHIN. **THERMAL TREATMENT OF PHOSPHOGYPSUM AS A SET RETARDER FOR PORTLAND CEMENT PRODUCTION**. 2021. Tese de Doutorado.

ATTALLAH, M. F. et al. Environmental impact assessment of phosphate fertilizers and phosphogypsum waste: Elemental and radiological effects. **Microchemical Journal**, v. 146, p. 789-797, 2019.

AWAD, Said et al. Properties, purification, and applications of phosphogypsum: A comprehensive review towards circular economy. **Materials Circular Economy**, v. 6, n. 1, p. 9, 2024.

BAO, Hao et al. Performance and mechanism of sand stabilization via microbial-induced CaCO₃ precipitation using phosphogypsum. **Journal of Cleaner Production**, v. 468, p. 142999, 2024.

BELLO, Suleiman K. et al. Mitigating soil salinity stress with gypsum and bio-organic amendments: A review. **Agronomy**, v. 11, n. 9, p. 1735, 2021.

BILAL, Essaid et al. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide. **Journal of Cleaner Production**, v. 414, p. 137561, 2023.

BLUM, Julius. **Aspectos agronômicos e ambientais da irrigação com efluente de estação de tratamento de esgoto e aplicação de fosfogesso em sistema de produção de cana de açúcar**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BONFIM, Sarah Andresa. Radônio como indicador de contaminação no solo por NAPLs. 2018.

BOUARGANE, Brahim et al. Effective and innovative procedures to use phosphogypsum waste in different application domains: review of the environmental, economic challenges and life cycle assessment. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 25, n. 3, p. 1288-1308, 2023.

BRASIL, Mosaic. **Bionutrição impulsiona produtividade e fortalece sustentabilidade com soluções biológicas da Mosaic.** Mosaic Brasil, 26 set. 2025. Disponível em: <<https://mosaicco.com.br/Article/>>. Acesso em: 5 out. 2025.

BRASIL, Mosaic. **Editais da Água: 4ª edição recebe inscrições para desenvolvimento de projetos para gestão de recursos hídricos.** Mosaic Brasil, 24 mar. 2022a. Disponível em: <[https://mosaicco.com.br/Noticias?&parentPriKeyID=-101&pmpm\[301\]\[pagPage\]=28](https://mosaicco.com.br/Noticias?&parentPriKeyID=-101&pmpm[301][pagPage]=28)>. Acesso em: 5 out. 2025.

BRASIL, Mosaic. **Mosaic Fertilizantes ingressa no mercado de insumos para produção orgânica.** Mosaic Brasil, 22 set. 2022. Disponível em: <<https://mosaicco.com.br/Article/Mosaic-Fertilizantes-ingressa-no-mercado-de-insumos-para-produ%C3%A7%C3%A3o-org%C3%A2nica>>. Acesso em: 5 out. 2025.

BUMANIS, Girts et al. Circular economy in practice: a literature review and case study of phosphogypsum use in cement. **Recycling**, v. 9, n. 4, p. 63, 2024.

CALADO, Bruno de Oliveira. **Geoquímica elemental e isotópica (Sr e Nd) como traçadores de poluentes antrópicos, caso de estudo: fosfogesso de Cubatão (SP).** 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CALDERÓN-MORALES, Bianca RS et al. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction. **Journal of building engineering**, v. 44, p. 102506, 2021.

CANUT, Mariana Moreira Cavalcanti. Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção. 2006.

CATÃO, Rayssa de Lourdes Carvalho Marinho et al. Avaliação do risco radioativo por níveis de

radônio-222 no ar de garimpos e ambientes internos de residências no Seridó Paraibano. 2023.

CHAVES, Hendrio Carvalho et al. Utilização do fosfogesso como matéria prima alternativa no setor da construção civil. 2021.

CHERNYSH, Yelizaveta et al. Phosphogypsum recycling: a review of environmental issues, current trends, and prospects. **Applied Sciences**, v. 11, n. 4, p. 1575, 2021.

COSTA, Letícia Magalhães da; SILVA, Martim Francisco de Oliveira. A indústria química e o setor de fertilizantes. 2012.

CUI, Yue et al. A systematic review of phosphogypsum recycling industry based on the survey data in China—applications, drivers, obstacles, and solutions. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 105, p. 107405, 2024.

CRUZ, V.H.L. Indústria Mineral Brasileira: o Agronegócio e os Fertilizantes. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2017. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-ermanentes/cme/audienciaspublicas/2017/debater-exploração-de-jazidas-de-fosforo-e-potassio-no-brasil/1.%20Vicente%20Humberto%20Lobo.pdf>. Acesso em: jan. 2025.

DA SILVEIRA, Claudia Siqueira. **Avaliação numérica do transporte de radionuclídeos em rocha fraturada**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DE ARAÚJO¹, Ana Paula Borges; FERNANDES, André Luis Teixeira. O passivo ambiental do fosfogesso gerado nas indústrias de fertilizantes fosfatados e as possibilidades de aproveitamento. 2013.

DE FOSFOGESSO, ANÁLISE PERCENTUAL DA UTILIZAÇÃO; VERMELHA, CERÂMICA. SANDRO DIAS PENA.

DE MELO, Rogério Alexandre Alves; SILVA, Débora Guimarães. Estudo da viabilidade do uso do fosfogesso como matéria-prima na produção de materiais cerâmicos. **e-xacta**, v. 6, n. 2, p. 13-31, 2013.

DE OLIVEIRA, Kerley Alberto Pereira. Fator de transferência de elementos terras raras em solos

tropicais tratados com fosfogesso. 2012.

DEGIRMENCI, Nurhayat; OKUCU, Arzu; TURABI, Ayse. Application of phosphogypsum in soil stabilization. **Building and environment**, v. 42, n. 9, p. 3393-3398, 2007.

DIAS, Elvira Gabriela; LAJOLO, Roberto D. O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no Brasil.

DIAS, Victor Pina; FERNANDES, Eduardo. Fertilizantes: uma visão global sintética. 2006.

DUARTE, Claudia N.; FERNANDES, Gislaine. Adição de Fosfogesso em Cerâmica Vermelha para Fabricação de Tijolos. **Revista Processos Químicos**, v. 3, n. 6, p. 55-60, 2009.

FERREIRA, Ana Mônica Medeiros. **Os instrumentos de incentivo à produção e uso de biodiesel no Brasil: uma análise constitucional sob o princípio do desenvolvimento sustentável**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

FERREIRA, Sara Beloti. **Potencial de redução da radiação do fosfogesso modificado com polímero**. 2020. Tese de Doutorado. [sn].

FONSECA, Dinalva Celeste. Metodologia para reciclagem de resíduos sólidos industriais. 2000.

G1. Projeto FOSFOGESSO tem inscrições abertas em Araxá. G1, 09 fev. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2022/02/09/projeto-fosfogesso-tem-inscricoes-abertas-em-araxa.ghtml>. Acesso em: 8 out. 2025.

GERALDO, Ricardo Rossasi et al. **Determination of radium-226 activity in phosphogypsum used as an addition to clinker by means of radon-222 measurements**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (Brazil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, 2021.

GOMES, Maria Terezinha Serafim. INDÚSTRIA E DINÂMICA ECONÔMICA: ALGUNS APONTAMENTOS SOBRE O SETOR DE FERTILIZANTES EM UBERABA-MG. **Revista GeoUECE**, v. 6, n. 10, p. 07-28, 2017.

GUAN, Qingjun et al. The impurity removal and comprehensive utilization of phosphogypsum: a

review. **Materials**, v. 17, n. 9, p. 2067, 2024.

GUEDRI, Abdessalam et al. Addition of Phosphogypsum to Fire-Resistant Plaster Panels: A Physic–Mechanical Investigation. **Inorganics**, v. 11, n. 1, p. 35, 2023.

HAO, Xiyang et al. The effect of phosphogypsum on greenhouse gas emissions during cattle manure composting. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, n. 3, p. 774-781, 2005.

HULL, C. D.; BURNETT, W. C. Radiochemistry of Florida phosphogypsum. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 32, n. 3, p. 213-238, 1996.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Fosfogesso pode ser solução para habitações populares. Agência USP, 12 dez. 2008. Disponível em: https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=fosfogesso-construcao-blocos-habitacoes-populares&id=010160081212#google_vignette. Acesso em: 8 out. 2025.

JOHN, Vanderley Moacyr. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

KHAN, Nadia et al. Recent advances in functional materials for wastewater treatment: from materials to technological innovations. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 4, p. 534, 2022.

KULCZYCKA, Joanna et al. Evaluation of the recovery of Rare Earth Elements (REE) from phosphogypsum waste—case study of the WIZÓW Chemical Plant (Poland). **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 345-354, 2016.

Lapido-Loureiro, F.E. & Melamed, R. (2009). O fósforo na agroindústria brasileira. Fertilizantes: Agroindústria e Sustentabilidade. F.E. Lápido-Loureiro, R. Melamed & J.F. Neto (eds), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 257-304.

Lapido-Loureiro, F.E. & Melamed, R. (2009). O gesso nos agrossistemas brasileiros: fontes e aplicações. F.E. Lápido-Loureiro, R. Melamed & J.F. Neto (eds), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 257-304.

LEÃO, Anderson Luiz Soares. Utilização da lignina alcalina como aditivo em pastas de cimento Portland classe G e sua influência no processo de carbonatação. 2019.

LEONE, J.; RIGO, M. L. O Fósforo – Reservas. NUTRIMOSAIC, 2020. Disponível em: <https://nutrimosaic.com.br/o-fosforo-reservas/>. Acesso em: mar. 2025.

LOPES, Carolina de Melo Nunes et al. Case Studies in Construction Materials.

LI, Xilin et al. Preparation of cemented oil shale residue–steel slag–ground granulated blast furnace slag backfill and its environmental impact. **Materials**, v. 14, n. 8, p. 2052, 2021.

LIN, Hai et al. Technologies for removing heavy metal from contaminated soils on farmland: A review. **Chemosphere**, v. 305, p. 135457, 2022.

LOMBA, Juliana Ferretti. **Incentivos fiscais para biocombustíveis: análise sobre a legitimação constitucional do instrumento tributário para fomento da RenovaBio**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LUZ, Caroline Angulski da et al. Comportamento do cimento sulfo-aluminoso (CSA) e da cinza pesada (CZP) no tratamento de resíduos: fosfogesso e lodo galvânico. 2005.

MAINA, Linda; KIEGIEL, Katarzyna; ZAKRZEWSKA-KOŁTUNIEWICZ, Grażyna. Challenges and Strategies for the Sustainable Environmental Management of Phosphogypsum. **Sustainability** (2071-1050), v. 17, n. 8, 2025.

MASHIFANA, T. P. Chemical treatment of phosphogypsum and its potential application for building and construction. **Procedia manufacturing**, v. 35, p. 641-648, 2019.

MAZZILLI, Bárbara; SAUEIA, Cátia Heloisa. Implicações radiológicas da utilização de fosfogesso como material de construção. **Ambiente Construído**, v. 1, n. 2, p. 17-22, 1997.

Meio Ambiente. Disponível em: <https://professoralucianekawa.blogspot.com/2014/07/fosfogesso-residuos-da-producao-de_24.html>. Acesso em: 7 out. 2025

MEN, Jiahui et al. Recycling phosphogypsum in road construction materials and associated environmental considerations: A review. **Heliyon**, v. 8, n. 11, 2022.

MESKINI, Sarra et al. Valorization of phosphogypsum as a road material: Stabilizing effect of fly ash and lime additives on strength and durability. **Journal of Cleaner Production**, v. 323, p. 129161, 2021.

METOGO, DANIEL ARTHUR NNANG. **Estudos laboratoriais e avaliação estrutural de um pavimento asfáltico construído com misturas de solo tropical, fosfogesso e cal**. 2015. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.

MINERAL DEVELOPMENT COMPANY. Typical analysis of phosphate rock. 2021. Disponível em: <https://www.mineraldevelopment.us/wp-content/uploads/2021/02/MDL-rock-spec-sheet.pdf>. Acesso em: 14 out. 2025.

MOHAMMED, Feisal et al. Sustainability assessment of symbiotic processes for the reuse of phosphogypsum. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 497-507, 2018.

MOTA, José Carlos et al. Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual. **Águas Subterrâneas**, 2009.

MUKABA, Jean-Luc et al. Rare earths' recovery from phosphogypsum: an overview on direct and indirect leaching techniques. **Minerals**, v. 11, n. 10, p. 1051, 2021.

NGO, Huong Thi Thanh et al. Utilization phosphogypsum as a construction material for road base: a case study in Vietnam. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, n. 1, p. 88, 2022.

NISTI, Marcelo Bessa. **Lixiviação de metais e radionuclídeos em solos tropicais condicionados com fosfogesso**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, Shirley Minell Ferreira de. Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária. **Master's degree dissertation, Univ. de Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil (in Portuguese)**, 2005.

PENG, Bo et al. Effects of pH and fineness of phosphogypsum on mechanical performance of cement-phosphogypsum-stabilized soil and classification for road-used phosphogypsum. **Coatings**, v. 10, n. 11, p. 1021, 2020.

PINTO, Marcelo Martins. Avaliação da implantação de cobertura vegetal em uma pilha de

fosfogesso. 2007.

PLIAKA, Maria; GAIDAJIS, Georgios. Potential uses of phosphogypsum: A review. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 57, n. 9, p. 746-763, 2022.

POTGIETER, J. H. et al. An investigation into the effect of various chemical and physical treatments of a South African phosphogypsum to render it suitable as a set retarder for cement. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 8, p. 1223-1227, 2003.

PPLWARE. A polémica ideia na Florida: usar resíduos radioativos para construir estradas. Pplware, 07 jan. 2025. Disponível em: <https://pplware.sapo.pt/planeta/a-polemica-ideia-na-florida-usar-residuos-radioativos-para-construir-estradas/>. Acesso em: 8 out. 2025.

Projeto Fosfogesso tem inscrições abertas em Araxá. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2022/02/09/projeto-fosfogesso-tem-inscricoes-abertas-em-araxa.ghtml>. Acesso em: 8 out. 2025.

QADIR, M.; GHAFOOR, A.; MURTAZA, G. Amelioration strategies for saline soils: a review. **Land Degradation & Development**, v. 11, n. 6, p. 501-521, 2000.

RECICLOS, Publicado Por. **Rejeito da indústria de fertilizantes na construção civil**. Disponível em: <https://blogreciclos.wordpress.com/2016/06/20/rejeito-da-industria-de-fertilizantes-na-construcao-civil/>. Acesso em: 5 out. 2025.

ROUT, Sonali et al. A comprehensive review on occurrence and processing of phosphate rock based resources-focus on REEs. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 45, n. 4, p. 368-388, 2024.

SAADAoui, Ezzeddine et al. Phosphogypsum: potential uses and problems—a review. **International Journal of Environmental Studies**, v. 74, n. 4, p. 558-567, 2017.

SILVA, Igor Araújo da et al. Avaliação do uso de resíduos de gesso hidratado em substituição à gipsita na produção de cimento Portland. 2023.

SILVA, Millena Vasconcelos et al. Phosphogypsum, tropical soil and cement mixtures for asphalt pavements under wet and dry environmental conditions. **Resources, conservation and recycling**,

v. 144, p. 123-136, 2019.

SILVA, Roberto Mattioli; GIULIETTI, Marco. Fosfogesso: geração, destino e desafios.

TAHER, M. A. Influence of thermally treated phosphogypsum on the properties of Portland slag cement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 1, p. 28-38, 2007.

TAHIRI, Hassane et al. Effect of biostimulants on growth and production parameters of green beans (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivated under North African climate. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 23, n. 5, p. 384-391, 2024.

TANG, P.; PURI, V. M. Methods for minimizing segregation: a review. **Particulate Science and Technology**, v. 22, n. 4, p. 321-337, 2004.

TASCA, Luana de Castro. Fosfogesso na indústria cimenteira: desafios e potenciais aplicações para a produção de cimento portland. 2025.

TAYIBI, Hanan et al. Environmental impact and management of phosphogypsum. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 8, p. 2377-2386, 2009.

VARGAS, Alexandre Silva de. Cinzas volantes álcali-ativadas para a obtenção de aglomerantes especiais. 2006.

VILLAYERDE, Freddy Lazo. Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso. **65 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear)–Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**, 2008.

WALSH, Michael; SCHENK, Gerhard; SCHMIDT, Susanne. Realising the circular phosphorus economy delivers for sustainable development goals. **NPJ Sustainable Agriculture**, v. 1, n. 1, p. 2, 2023.

YAMAMURA, Amanda Pongeluppe Gualberto. **Aplicação de nanotecnologia no meio ambiente: biossorvente magnético na remoção de urânio**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

YUAN, Pengxing et al. Advances in Phosphogypsum Calcination and Decomposition Processes in

Circulating Fluidized Beds. ACS omega, v. 9, n. 38, p. 39307-39325, 2024.

ZHANG, Jixin et al. Phosphogypsum-based building materials: Resource utilization, development, and limitation. **Journal of Building Engineering**, v. 91, p. 109734, 2024.

ZMEMLA, Raja et al. A phosphogypsum-based road material with enhanced mechanical properties for sustainable environmental remediation. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 41, n. 1, p. e13732, 2022.

ZUQUETTI GONÇALVES, Elaine Cristina et al. ADITIVOS E ADIÇÕES NO CONCRETO. **Global Science & Technology**, v. 13, n. 1, 2020.