

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Luana de Castro Tasca



**Fosfogesso Na Indústria Cimenteira: Desafios e Potenciais
Aplicações Para a Produção de Cimento Portland**

RIO DE JANEIRO

2025

Luana de Castro Tasca

**FOSFOGESSO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA: DESAFIOS E POTENCIAIS
APLICAÇÕES PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Químico Industrial.

Orientador(es): Chaline Detoni, D.Sc.
Sara de Carvalho Zago, D.Sc.

Rio de Janeiro
2025

CIP - Catalogação na Publicação

d197f de Castro Tasca, Luana
Fosfogesso Na Indústria Cimenteira: Desafios e
Potenciais Aplicações Para a Produção de Cimento
Portland / Luana de Castro Tasca. -- Rio de
Janeiro, 2025.
98 f.

Orientadora: CHALINE DETONI.
Coorientadora: SARA DE CARVALHO ZAGO.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Química Industrial, 2025.

1. fosfogesso. 2. cimento Portland. 3.
sustentabilidade. 4. construção civil. 5. gesso. I.
DETTONI, CHALINE, orient. II. DE CARVALHO ZAGO,
SARA, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Luana de Castro Tasca

**FOSFOGESSO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA: DESAFIOS E POTENCIAIS
APLICAÇÕES PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Químico Industrial.

Aprovado em 24 de fevereiro de 2025.

CHALINE DETONI, D.Sc., UFRJ

SARA DE CARVALHO ZAGO, D.Sc., UFRJ

GABRIEL BATALHA LEONI, D.Sc., UFRJ

EVERTON GRIPA, D.Sc., UFRJ

Rio de Janeiro
2025

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho representa não apenas a superação de grandes desafios, mas também a soma de esforços, apoio e incentivo de pessoas fundamentais ao longo desta caminhada. No entanto, não caminhei sozinha. A cada um que, de alguma forma, contribuiu para essa conquista, expresso aqui minha mais sincera gratidão.

Primeiramente, agradeço a Deus, minha fortaleza e refúgio, fonte inesgotável de força, esperança e sabedoria em todos os momentos. Foi Sua graça que me sustentou e me deu ânimo para seguir, mesmo diante das dificuldades, sem Ele nada disso teria sido possível.

Ao meu esposo, Adriel Tasca, meu parceiro de vida, cujo amor, paciência e apoio incondicional foram essenciais nesta trajetória. Suas palavras de incentivo para que eu pudesse subir cada degrau, suas orações e seu companheirismo foram fundamentais nessa caminhada.

Ao meu pai, Antônio Magalhães, minha mãe, Ana Castro, e meus irmãos, Bruno Castro e Samuel Castro, que estiveram ao meu lado desde o início, oferecendo todo suporte necessário para realização desse sonho. As orações, a compreensão e incentivo foram fundamentais, obrigada por nunca me deixarem desanimar e por celebrarem comigo cada pequena conquista. Esse sonho também é de vocês.

À minha família do coração, Isabel Barros, Lizander Lopes e Júlia Lopes, pelo carinho e apoio, a generosidade e o amor de vocês marcaram minha trajetória de uma forma que jamais poderei esquecer.

Aos meus queridos sogros Pr. Sérgio e Pra. Paula que além de serem minha família, são também meus pastores, exemplos de fé e dedicação. Agradeço por todas as orações e palavras de incentivo ao longo desta jornada.

Aos meus amigos, Karolinne de Oliveira, Daniel Xavier, Juliana Albano e Carolina Diz, pelos momentos de aprendizagem compartilhados, pela parceria, pelo incentivo mútuo e pelo companheirismo em cada desafio superado.

Às minhas orientadas, pelo acompanhamento durante a realização deste trabalho e pela contribuição para a conclusão desta etapa acadêmica e ao coordenador da CSN por contribuir tanto a esse estudo.

*"Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos."*

Provérbios 16:3.

RESUMO

TASCA, Luana de Castro. **Fosfogesso Na Indústria Cimenteira: Desafios E Potenciais Aplicações Para A Produção Sustentável De Cimento Portland.** Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Há muitos desafios e possibilidades relacionados ao uso do fosfogesso como alternativa à gipsita natural na produção de cimento Portland. A indústria da construção civil busca soluções sustentáveis para reduzir os impactos ambientais associados à produção de cimento, cuja fabricação é uma das principais emissoras de CO₂. O fosfogesso, subproduto da indústria de fertilizantes, surge como uma alternativa viável devido à sua composição rica em sulfato de cálcio. No entanto, a presença de impurezas, como fosfatos e fluoretos solúveis, pode interferir nas propriedades do cimento, exigindo tratamentos específicos. Esta pesquisa explora os benefícios ambientais e econômicos da substituição parcial ou total do gesso, abordando estudos de caso e tecnologias de tratamento que minimizem as limitações do fosfogesso. Os resultados indicaram que a incorporação desse resíduo contribui para a economia circular, reduzindo custos e impactos ambientais, desde que sejam adotadas medidas adequadas de tratamento, controle e regulamentação. Assim, o fosfogesso se apresenta como uma alternativa promissora para a indústria cimenteira, desde que haja investimentos em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar sua viabilidade técnica e econômica.

Palavras-chave: fosfogesso; cimento Portland; sustentabilidade; construção civil.

ABSTRACT

TASCA, Luana de Castro. **Fosfogesso Na Indústria Cimenteira: Desafios E Potenciais Aplicações Para A Produção Sustentável De Cimento Portland.** Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

There are many challenges and possibilities related to using phosphogypsum as an alternative to natural gypsum in producing Portland cement. The construction industry seeks sustainable solutions to reduce the environmental impacts of cement production, which is one of the main CO₂ emission sources. Phosphogypsum, a byproduct of the fertilizer industry, emerges as a viable alternative due to its calcium sulfate-rich composition. However, the presence of impurities such as soluble phosphates and fluorides can interfere with the properties of cement, requiring specific treatments. This research explores the environmental and economic benefits of partially or fully replacing natural gypsum, addressing case studies and treatment technologies that mitigate phosphogypsum's limitations. The results indicate that incorporating this residue contributes to the circular economy, reducing costs and environmental impacts, provided that adequate control and regulatory measures are adopted. Thus, phosphogypsum presents itself as a promising alternative for the cement industry, as long as investments in research and development are made to improve its technical and economic feasibility.

Keywords: phosphogypsum; Portland cement; sustainability; construction industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mineração de rochas fosfáticas.

Figura 2 - Depleção da base de reserva.

Figura 3 - Esquema simplificado do processo di-hidrato.

Figura 4 - Sistemas radiculares das plantas com e sem aplicação de gesso agrícola.

Figura 5 - Concentração total de As versus pH em amostras de fosfogesso.

Figura 6 - Série de decaimento do ^{238}U .

Figura 7 - Fluxo e distribuição dos radionuclídeos no processo de extração com H_2SO_4 .

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das propriedades do fosfogesso.

Tabela 2 - Dados sobre as reservas brasileiras de rochas fosfáticas.

Tabela 3 - Comparativo dos projetos minerários no Brasil.

Tabela 4 - Composição química do fosfogesso.

Tabela 5 - Comparaçao do fosfogesso em relação a tecnologias geradoras.

Tabela 6 - Resultados de produtividade em sacas beneficiadas por hectare.

Tabela 7 - Resultados das taxas de exalação de radônio.

Tabela 8 - Comparaçao entre os métodos de tratamento do fosfogesso.

Tabela 9 - Radioatividade de fosfogesso em diferentes países.

Tabela 10 - Porcentagens em massa de fosfogesso na mistura com gipsita.

Tabela 11 - Regulamentação de resíduos radioativos em diferentes países.

Tabela 12 - Tempo de pega CPI Gesso x Fosfogesso.

Tabela 13 - Propriedades Mecânicas do Cimento com Fosfogesso.

Tabela 14 - Características físicas e químicas do fosfogesso.

Tabela 15 - Parâmetros do FOS A, FOS B e GIP do ESTUDO A.

Tabela 16 - Processos de tratamento do fosfogesso utilizados no estudo.

Tabela 17.1 - Propriedades físicas das argamassas frescas com 2.5% de incorporação.

Tabela 17.2 - Propriedades físicas das argamassas frescas com 5% de incorporação.

Tabela 18 - Resumo dos parâmetros para o comportamento mecânico mais adequado.

Tabela 19 - Tempo de Pega e Expansibilidade.

Tabela 20 - Resistência à compressão aos 1, 7 e 28 dias das amostras.

Tabela 21 - Resistência à flexão aos 1, 7 e 28 dias das amostras.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP I - Cimento Portland Tipo I

CP II - Cimento Portland Composto

CP III - Cimento Portland de Alto-Forno

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

DRX - Difração de Raios X

DTG - Derivada Termogravimétrica

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

IAEA - Agência Internacional de Energia Atômica

IFA - International Fertilizer Association

MAP - (Fosfato Monoamônico

NBR - Normas Técnicas Brasileiras

NORM - Materiais Radioativos de Ocorrência Natural

RIMA - Relatório de Impacto ao Meio Ambiente

SSP - (Superfosfato Simples)

TBP - Fosfato de tributila

TSP - (Superfosfato Triplo)

TENORM - Materiais Radioativos de Ocorrência Natural Tecnologicamente Aprimorados

UCOS - Utilização de concreto com gesso e fosfogesso

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. Objetivo Geral	15
1.1.2. Objetivos específicos	15
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. FOSFOGESSO: O QUE É?	17
2.2. GERAÇÃO DE FOSFOGESSO	20
2.2.1. Matérias-primas	20
2.2.2. A produção de ácido fosfórico	26
2.2.2.1. Processo di-hidrato	27
2.2.2.2. Processo hemi-hidrato	29
2.2.2.3. Processo hemi-dihidrato	30
2.3. APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO	33
2.3.1. Agricultura	33
2.3.2. Construção civil	35
2.3.2.1. Produção de cimento Portland	37
2.3.2.2. Gesso de revestimento	41
2.4. LIMITAÇÕES DO EMPREGO DO FOSFOGESSO	43
2.4.1. Contaminantes	46
2.4.2. Pré-tratamentos necessários	49
2.5. IMPACTOS AMBIENTAIS DO FOSFOGESSO	52
2.5.1. Destinação final: Empilhamento	56
2.5.2. Destinação final: Mar	56
2.6. REGULAMENTAÇÃO SOBRE A PRODUÇÃO E DISPOSIÇÃO	57
3. METODOLOGIA	63
3.1. NATUREZA DO TRABALHO	63
3.2. ESTUDO DE CASO	64

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1. USO DE FOSFOGESSO NO CIMENTO PORTLAND	65
4.1.1 Propriedades do Fosfogesso para Uso em Cimento	65
4.2. ESTUDO DE CASO	67
4.3. ESTUDOS DE CASO E APLICAÇÕES PRÁTICAS	72
4.3.1. Estudo A	72
4.3.2. Estudo B	74
4.3.3. Estudo C	78
4.4. PERSPECTIVAS DE UTILIZAÇÃO	82
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	83
6. REFERÊNCIAS	84

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil está em constante busca por soluções sustentáveis e inovadoras para minimizar os impactos ambientais gerados pela produção de materiais de construção civil. Entre os principais insumos utilizados, o cimento é fundamental, especialmente o cimento Portland, que é amplamente empregado em diversas obras, desde a construção de edificações e infraestruturas de grande porte, como pavimentos e pontes (COSTA *et al.*, 2024).

Esse material é predominantemente composto por clínquer, um aglomerante que resulta da queima de matérias-primas como calcário e argila a altas temperaturas. Tradicionalmente, o cimento Portland utiliza a gipsita natural como fonte de sulfato de cálcio, mas a disponibilidade limitada dessa substância em algumas regiões, além dos altos custos e impactos ambientais do transporte, tem levado a indústria a buscar alternativas (MACHADO, 2024).

Em termos de impacto global, a produção de cimento é responsável por uma parcela significativa das emissões de dióxido de carbono (CO₂), estimando-se que, para cada tonelada de cimento produzido, são liberados aproximadamente 866 kg de CO₂. A indústria do cimento, portanto, é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa, representando cerca de 5% das emissões globais. Embora o Brasil se destaque com medidas mitigadoras que contribuíram para reduzir a emissão per capita de CO₂ na indústria cimenteira, o uso de alternativas sustentáveis, como o fosfogesso, pode contribuir de forma significativa para a diminuição dos impactos ambientais dessa indústria (TCHERNICHÉ *et al.*, 2021).

Uma dessas alternativas é o fosfogesso, um subproduto gerado pela indústria de fertilizantes, especialmente na produção de ácido fosfórico. O fosfogesso apresenta-se como uma possível substituição à gipsita natural, pois possui uma composição rica em sulfato de cálcio. Contudo, esse resíduo é caracterizado pela presença de impurezas, como fosfatos e fluoretos solúveis, que podem interferir nos processos de hidratação do cimento, afetando propriedades importantes, como o tempo de pega e a resistência inicial do material (RODRIGUES *et al.*, 2023).

Essas dificuldades podem ser minimizadas com o uso de técnicas de tratamento, como a combinação do fosfogesso com cal hidratada, que têm sido exploradas na literatura como uma solução promissora para viabilizar seu uso na construção civil (COSTA, 2020). Além disso, o uso do fosfogesso na indústria cimenteira também representa uma oportunidade para a gestão adequada de resíduos industriais, uma vez que, globalmente, a geração de fosfogesso já ultrapassa 7 bilhões de toneladas, com uma taxa de utilização inferior a 15%. A incorporação desse material

na produção de cimento pode não apenas contribuir para a redução do impacto ambiental da indústria cimenteira, mas também promover uma forma mais sustentável de destinação de resíduos industriais (CARVALHO, 2021).

Nesse sentido, este trabalho analisou as perspectivas e desafios do uso do fosfogesso como alternativa à gipsita natural na produção de cimento Portland, abordando as tecnologias de tratamento, as propriedades do fosfogesso, os impactos ambientais associados e as alternativas regulatórias e econômicas que favorecem sua adoção no Brasil. A pesquisa buscou oferecer um panorama sobre as potencialidades desse resíduo como insumo na construção civil, além de avaliar os fatores que têm impulsionado sua utilização no setor.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral apresentar o fosfogesso, ou gesso químico e avaliar as diferentes tecnologias de tratamento e alternativas de reaproveitamento desse resíduo, compreendendo suas características, aplicações, impactos ambientais e aspectos regulatórios. Além de analisar empiricamente as principais razões que direcionaram o mercado brasileiro a utilizar o fosfogesso na área de construção civil.

1.1.2. Objetivos específicos

O objetivo geral deste trabalho foi dividido em objetivos específicos:

- I. Realizar uma pesquisa abrangente da literatura sobre trabalhos e estudos publicados em diversas bases de dados acadêmicas, visando entender as diferentes tecnologias de tratamento e uso do fosfogesso. Isso incluiu abordar suas características, aplicações, comparar as tecnologias utilizadas e avaliar os aspectos ambientais relacionados ao tratamento do fosfogesso nas indústrias. Também teve como objetivo compreender o processo de adoção de novas tecnologias e as motivações por trás dessas mudanças.
- II. Realizar pesquisas em plataformas da indústria química e consultar órgãos reguladores e legislações pertinentes ao tratamento e utilização do fosfogesso, levando em consideração os problemas e restrições associadas ao descarte e reaproveitamento desse subproduto.

III. Analisar o caso real de uma indústria cimenteira que utilizou o fosfogesso como insumo, avaliando os fatores que influenciam a decisão de implementar ou declinar do uso do fosfogesso visando entender as principais razões que direcionaram o mercado brasileiro a utilizar o fosfogesso na área de construção civil. Esta análise empírica servirá de exemplo e contribuirá para a discussão fundamentada do tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FOSFOGESSO: O QUE É?

O termo fosfogesso é frequentemente referido na literatura técnica como: subprodutos de gesso, gesso químico, resíduos de gesso, gesso agrícola e gesso sintético. Isto pois corresponde a um resíduo sólido classificado como um tipo de gesso químico, cujas características químicas e físicas são semelhantes à gipsita natural, o sulfato de cálcio di-hidrato usado na produção de gesso. Entretanto, o fosfogesso consiste em um subproduto da produção de ácido fosfórico (H_3PO_4) nas indústrias de fertilizantes fosfatados (PEIXOTO; HENKES, 2023). Sua geração se dá através do ataque do ácido sulfúrico (H_2SO_4) ao concentrado fosfático, proveniente do processo de beneficiamento de rochas fosfáticas, visando a produção de ácido fosfórico, como representado na Equação 1 (FERNANDES *et al.*, 2017).

Durante a produção do ácido fosfórico, para cada 6 mol de H_3PO_4 produzidos, são gerados 10 mol de fosfogesso (Eq. 1), isso equivale a 7 toneladas de fosfogesso por tonelada de P_2O_5 produzidos. A quantidade de fosfogesso gerada pode variar, levando em consideração a qualidade da rocha fosfática, o processo de produção do ácido fosfórico e ainda as tecnologias de recuperação do fosfogesso. Por essa razão, o fosfogesso é considerado um grande passivo ambiental, sendo hoje um problema para as empresas produtoras de fertilizantes e ácido fosfórico (COSTA, 2020).



O fosfato natural, usado na produção de ácido fosfórico, pode variar em sua solubilidade, de acordo com a origem da rocha. Geralmente a rocha fosfática de origem sedimentar apresenta maior solubilidade, especialmente por sua natureza menos cristalina. Por outro lado, e com menor solubilidade estão as rochas fosfáticas ígneas, com alto grau de cristalinidade, que tendem a ter um efeito residual mais pronunciado no processo de digestão (MACHADO, 2024).

Segundo Peixoto e Henkes (2023) a produção global anual de fosfogesso é estimada em 150 milhões de toneladas. Desse total, aproximadamente 6 milhões de toneladas são produzidas no Brasil, sendo que a maior parte da produção ocorre nos estados de Minas Gerais e São Paulo, especialmente nas áreas onde estão localizados os municípios de Uberaba e Cubatão.

A composição química do fosfogesso é essencialmente sulfato de cálcio di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) com cerca de 17,7% de enxofre (S), 30,9% de óxido de cálcio (CaO), 0,2% de flúor (F) e 0,7% de fósforo (P_2O_5), contendo ainda impurezas residuais como metais pesados e materiais insolúveis, como exibido na Tabela 1. Quimicamente, é semelhante à gipsita sendo frequentemente utilizado em aplicações industriais e agrícolas. Sua composição química pode variar dependendo da natureza da rocha fosfática, das matérias primas e operações industriais para obtenção do ácido fosfórico (GRACIOLI, 2016).

Tabela 1 - Resumo das propriedades do fosfogesso

PROPRIEDADES	DESCRIÇÃO
Composição química	Sulfato de cálcio di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) com 18% de enxofre, 31% de óxido de cálcio, 0,2% de flúor e 0,7% de fosfato
Contaminantes	Metais pesados e materiais insolúveis, por exemplo, arsênio, chumbo, flúor, cádmio, entre outros
Granulometria	Em torno de 0,1 mm a 10 mm
Umidade	Geralmente abaixo de 10%
Solubilidade	Baixa solubilidade em água
pH	Na faixa da neutralidade a ligeiramente ácido, em torno de 6 a 7
Aplicações	Aditivo na construção civil, argamassa, contrapiso para estradas, corretivo de solo na agricultura, fabricação de gesso, produção de estuque, aterros sanitários e não sanitários, entre outros

Fonte: Adaptada de Graciolli (2016).

Nas indústrias de Cubatão (SP) e Uberaba (MG), o fosfogesso após o processo de fabricação do ácido fosfórico, apresenta inicialmente um teor de umidade de 25% a 30% ao ser depositado em pilhas. Dois fatores que contribuem para a diminuição da umidade do fosfogesso são: a drenagem natural e a exposição à energia solar. Na indústria de Catalão (GO), o fosfogesso tem características físicas diferentes, pois este é direcionado diretamente para as pilhas. Essas características podem incluir distribuição de tamanho de partículas distintas, menor retenção de água devido à ausência do processo de decantação e composição química que pode variar ligeiramente devido a diferenças nos processos de produção entre as instalações industriais (SILVA, 2015).

A solubilidade do fosfogesso é de aproximadamente 2,5 g/L, podendo variar de acordo com fatores que influenciam sua capacidade de dissolução. A rápida dissolução das partículas ocorre devido ao tamanho das mesmas, quanto menor, mais rápido o processo, e à acidez do meio: quanto mais ácido, mais solúvel o fosfogesso se torna (PEIXOTO; HENKES, 2023).

Sendo o fosfogesso um resíduo industrial, é importante compreender como este se comporta e se encaixa diante das normativas conhecidas. Isto pois a categorização dos resíduos é essencial para a tomada de decisões quanto ao gerenciamento, armazenamento, coleta, transporte e disposição final desses resíduos. No Brasil, a norma NBR 10004 estabelece que o fosfogesso é classificado como resíduo sólido classe II A, sendo considerado um resíduo não perigoso e não-inerte (ABNT, 2004).

Como um resíduo não perigoso, porém não inerte, devido à sua solubilidade em água, o fosfogesso, apesar de não representar um risco imediato de contaminação ao solo e corpos hídricos, está sujeito a alterações em sua composição ao longo do tempo devido à interação com o ambiente, podendo resultar em uma eventual liberação de agentes tóxicos. Essa classificação indica que o fosfogesso não apresenta características perigosas que o tornem uma ameaça significativa para a saúde humana ou o meio ambiente quando devidamente gerenciado e disposto. No entanto, isso não significa que seja completamente livre de impactos ambientais potenciais (TCHERNICHÉ *et al.*, 2021).

A NBR 10005 refere-se ao teste de lixiviação que busca simular a percolação de água sobre o resíduo e avaliar se substâncias perigosas podem ser extraídas ao entrar em contato com a água. Embora classificado como não perigoso pela NBR 10004, o fosfogesso contém componentes químicos que, ao longo do tempo, podem ser mobilizados com a infiltração de água. Os testes de lixiviação são importantes para verificar a possibilidade de liberação de metais pesados ou elementos radioativos em concentrações que possam contaminar o solo e as águas subterrâneas. Assim, o ensaio de lixiviação orienta medidas de controle e cuidados no descarte do fosfogesso, como barreiras físicas e coberturas impermeáveis, que limitam a infiltração de água e minimizam a liberação de contaminantes (ABNT, 2004).

A NBR 10006 trata do teste de solubilização, que verifica se substâncias presentes no resíduo podem se dissolver em água e serem transportadas, contaminando corpos hídricos próximos. Esse teste mede a solubilidade de componentes específicos do fosfogesso, como compostos ácidos e alguns metais. Sendo o fosfogesso classificado como um resíduo não inerte,

ele tem componentes solúveis que, ao serem liberados, podem se dispersar pelo meio ambiente, afetando a qualidade da água e do solo. Os resultados desse teste ajudam a determinar os parâmetros de armazenamento e disposição, assegurando que o resíduo seja manejado de forma a reduzir o risco de contaminação das águas superficiais e subterrâneas (ABNT, 2004).

O fosfogesso pode conter certos componentes químicos e físicos que exigem cuidados específicos no seu manuseio, armazenamento e disposição final; podendo conter impurezas, principalmente metais radioativos, elevada acidez e metais pesados, por isso é importante que o fosfogesso seja gerenciado de forma responsável e em conformidade com as regulamentações ambientais aplicáveis. Isso garante a proteção da saúde pública e a preservação do meio ambiente (MELO; SILVA, 2014).

Segundo Melo e Silva (2014), quando se trata de radioatividade, os resíduos sólidos são classificados como “NORM” (*Naturally Occurring Radioactive Materials*) definido como todos os minérios que contêm material radioativo de ocorrência natural ou “TENORM” (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*) definido como rejeitos e subprodutos que contêm material radioativo de ocorrência natural concentrado tecnologicamente. Devido à perturbação do equilíbrio radioativo da rocha fosfática, o fosfogesso pertence à classe de resíduos radioativos “TENORM”.

2.2. GERAÇÃO DE FOSFOGESSO

2.2.1. Matérias-primas

A principal matéria-prima utilizada nas indústrias de fertilizantes para a produção de ácido fosfórico e produtos fosfatados, e consequentemente de fosfogesso, são os minerais apatíticos. Esses minerais são extraídos de rochas fosfatadas, que possuem fosfato (P_2O_5), a principal fonte de fósforo (P) presente nos fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura global. Embora o fósforo exista em abundância na natureza e esteja presente em numerosos minerais, apenas os da série da apatita constituem minerais de minério, ou seja, são fontes comerciais de fósforo (GRUBER et al., 2024).

Os minérios de fósforo se formam em ambientes geológicos variados, podendo ser de origem ígnea ou sedimentar. Nas rochas ígneas, ocorrem variedades como fluorapatita [$Ca_5(PO_4)_3(CO_3,OH)_3.(F,OH)$], hidroxiapatita [$Ca_5(PO_4)_3.(OH,F)$] e, mais raramente, cloroapatita [$Ca_5(PO_4)_3.(Cl,OH)$], principalmente em carbonatitos. Já nos depósitos sedimentares

predominam carbonatoapatita $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3 \cdot (\text{OH}, \text{F})]$ e carbonato-fluorapatita $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3 \cdot (\text{F}, \text{OH})]$. A Figura 1 demonstra uma mineração de rochas fosfáticas em operação (PEIXOTO; HENKES 2023).

Figura 1 - Mineração de rochas fosfáticas.



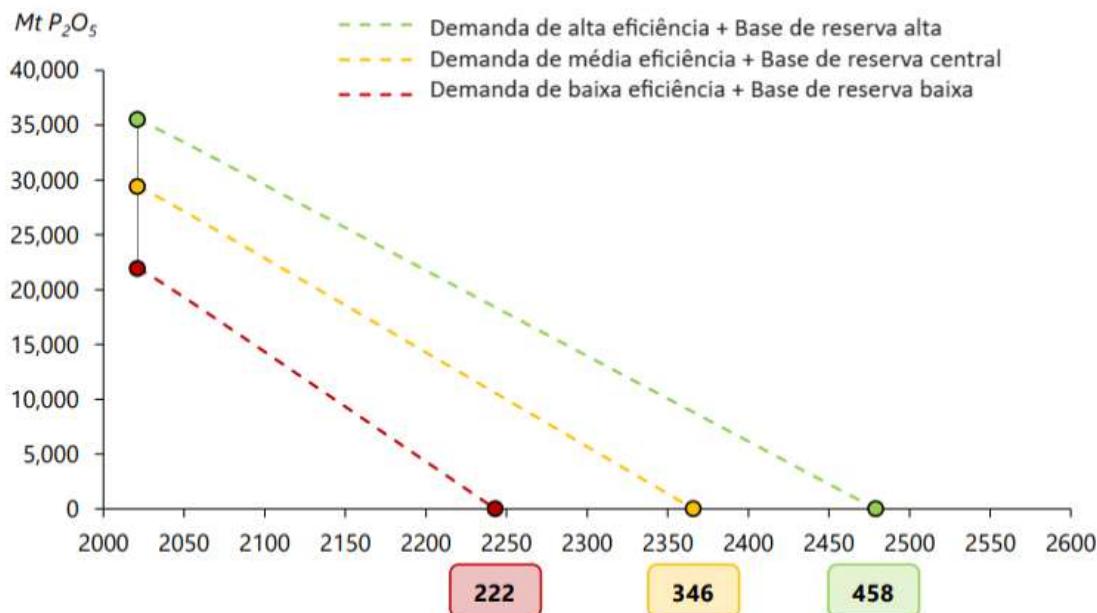
Fonte: Divulgação/Embrapa

De acordo com Machado (2024), as estimativas apontam um total de aproximadamente 300 bilhões de toneladas de rocha fosfática, com uma concentração significativa de depósitos localizados no norte da África e nos Estados Unidos. Os recursos *in situ* de rocha fosfática podem variar entre 270 e 420 bilhões de toneladas, variando entre 45 e 88 bilhões de toneladas de P_2O_5 . Alguns dos recursos são considerados restritos, pois são localizados em áreas ecologicamente sensíveis, onde a mineração não seria possível, além dos recursos especulativos, que representam a proporção da área explorada em países conhecidos por possuírem depósitos significativos de fosfato.

Apesar de preocupações sobre a escassez desse recurso, um relatório da *International Fertilizer Association* (IFA) e Argus (2023) indicou que a rocha fosfática será suficiente por pelo menos 346 anos, considerando um cenário médio de demanda agrícola. Dependendo do consumo futuro, a disponibilidade pode variar entre 222 e 458 anos. Essa estimativa considera a base de reserva, que representa os depósitos tecnicamente recuperáveis com a tecnologia atual. As

estimativas da base de reserva foram comparadas com as projeções de demanda da IFA para uso agrícola até 2050, como ilustrado na Figura 2, levando em consideração outras aplicações de fertilizantes, usos industriais e perdas de processamento.

Figura 2 - Depreção da base de reserva.



Fonte: Adaptado de IFA; Argus Media. Phosphate Rock Resources & Reserves 2023.

As maiores reservas de rochas fosfáticas do mundo estão concentradas no Marrocos e nos Estados Unidos. Embora aproximadamente 40 países produzam concentrados de fosfato, 12 dessas nações são responsáveis por 92% da produção global. Os Estados Unidos lideram essa produção, com uma participação entre 33% e 34%, seguidos por China, Marrocos e Rússia (CAMPOS, 2023). O Brasil ocupa a 8^a posição entre os maiores produtores de concentrado de rocha fosfática, contribuindo com 3,4% da produção mundial. As reservas brasileiras de rochas fosfáticas são estimadas em cerca de quatro bilhões de toneladas, representando aproximadamente 1% das reservas globais em termos de P₂O₅. Na Tabela 2 são exibidas a distribuição percentual e os valores equivalentes em toneladas das reservas brasileiras de rochas fosfáticas (CHAVES, 2021).

Tabela 2 - Dados sobre as reservas brasileiras de rochas fosfáticas.

ESTADO	PORCENTAGEM DAS RESERVAS NACIONAIS (%)	RESERVAS (Toneladas)

Minas Gerais	73,80%	2.952.000.000
Goiás	8,30%	332.000.000
São Paulo	7%	292.000.000
Santa Catarina, Pernambuco, Bahia e Paraíba	11%	424.000.000
Total Geral	100%	4.000.000.000

Fonte: Adaptada de (CHAVES, 2021).

Segundo os dados obtidos no Programa de Parcerias de Investimentos (PPI), na Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) e no Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), novos projetos minerários para fosfato no Brasil têm sido empregados e pode ser observado um comparativo na Tabela 3 com dados de previsão de fosfogesso gerados baseado na produção de ácido fosfórico (ANDA, 2023; IBRAM, 2024).

Tabela 3 - Comparativo dos projetos minerários no Brasil.

PROJETO	SANTA QUITÉRIA	SERRA DO SALITRE	FOSFATO DE MIRIRI
Localização	Ceará	Minas Gerais	PE-PB
Reservas Estimadas (milhões de toneladas)	9,5	100	102,9
Teor Médio de P ₂ O ₅	13%	12,50%	3,91%
Produção Anual de Fosfato (mil toneladas)	240	1.200	60
Produção H ₃ PO ₄ (mil toneladas)	48	250	12
Fosfogesso Gerado (milhões de toneladas)	1,2	6	0,3
Características do Fosfogesso	Qualidade adequada para construção civil	Aplicação em recuperação de solos	Aplicação em agricultura e construção civil

Fonte: Adaptado de IBRAM (2024) e ANDA (2023).

A previsão de geração de fosfogesso é feita com base nas estimativas de produção de fosfato dos projetos mencionados. Esses valores destacam o potencial do Brasil em atender à demanda crescente por fertilizantes e subprodutos, além de oferecer características que orientam nas soluções para a destinação adequada do fosfogesso (ANDA, 2023; IBRAM, 2024).

O Projeto Santa Quitéria, no Ceará, combina a exploração integrada de urânio e fosfato, destacando-se pela produção de fertilizantes e matéria-prima estratégica para energia nuclear. Localizado em uma região semiárida, adota práticas ambientais para minimizar impactos em ecossistemas sensíveis, integrando os setores agrícola, energético e de desenvolvimento regional. Já o Projeto Serra do Salitre, em Minas Gerais, é um exemplo de verticalização, com operações que vão da mineração ao beneficiamento e produção de fertilizantes como SSP (Superfosfato Simples), TSP (Superfosfato Triplo) e MAP (Fosfato Monoamônico), usados em culturas agrícolas importantes, esse projeto moderno reduz a dependência brasileira de fertilizantes importados, promovendo maior autossuficiência. Por fim, o Projeto Fosfato de Miriri, localizado entre Pernambuco e Paraíba, atende à demanda do Nordeste, destacando-se por sua proximidade a portos e mercados consumidores. Apesar do teor relativamente baixo de P_2O_5 , a abundância de reservas e a validação técnica da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) tornam o projeto viável, com potencial de impulsionar o desenvolvimento econômico regional (ANDA, 2023; IBRAM, 2024).

No contexto nacional, as principais reservas de rocha fosfática estão localizadas nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, com notável destaque para os depósitos naturais de fosfato em Patos de Minas (MG), Araxá (MG), Catalão (GO), Jacupiranga (SP), Abaeté (MG) e Alvorada (SP). Recentemente, foi identificado um depósito em Lavras do Sul (RS), onde será extraído o fosfato natural conhecido como Pampafos. As reservas geológicas brasileiras de fosfato natural são estimadas entre 2,5 e 3,5 bilhões de toneladas, com um teor médio de 12% a 13% de P_2O_5 (BOSCHIERO, 2023).

No Brasil, as principais fontes de fosfato para as indústrias químicas e de fertilizantes são as jazidas magmatogênicas, que apresentam um significativo enriquecimento supergênico e estão associadas a complexos alcalino-carbonatíticos. Aproximadamente 80% das jazidas de fosfato no território nacional têm origem ígnea e estão relacionadas a ambientes geológicos vulcânicos, como os complexos de Araxá/Tapira (MG), Catalão/Ouvidor (GO), Jacupiranga/Cajati (SP), caracterizados pela presença predominante de carbonatos e minerais micáceos, com teores relativamente baixos de P_2O_5 (CARVALHO, 2020).

Por outro lado, os depósitos de origem sedimentar (20%) estão localizados principalmente no Nordeste brasileiro, especialmente em Pernambuco e Bahia. Também são encontrados em outras áreas, como no município de Lagamar (MG), onde os depósitos estão presentes na Formação Paraopeba. Esses depósitos sedimentares consistem em rochas mineralizadas de fosfato dentro de siltitos e folhelhos calcíferos. Outros tipos de depósitos de fosfato incluem jazidas de concentração residual encontradas em Anitápolis (SC), Pirocaua e Trauira no Maranhão, bem como depósitos do tipo guano em Fernando de Noronha (CARVALHO, 2020; BOSCHIERO, 2023).

É importante ressaltar que a disponibilidade de matérias-primas e reservas pode variar de tempos em tempos devido a fatores como exploração, demanda e investimento na exploração mineral. O processo de produção mais comumente utilizado pela indústria nacional consiste na solubilização do concentrado de rocha fosfática com ácido sulfúrico diluído e aquecido (GRUBER *et al.*, 2024).

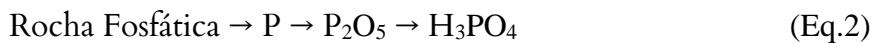
O ácido sulfúrico desempenha um papel crucial devido à sua capacidade de reagir com o fosfato de cálcio. A reação química entre o ácido sulfúrico e o fosfato de cálcio resulta na produção de ácido fosfórico e sulfato de cálcio, que poderá cristalizar como di-hidrato, hemidrato ou anidro, em função da temperatura adotada no processo de produção. O processo ocorre sob constante agitação, durante um período pré-definido, que varia de acordo com as características físico-químicas do concentrado de rocha fosfática utilizado. O objetivo principal da produção de ácido fosfórico via úmida, utilizando ácido sulfúrico, é produzir ácido fosfórico com um elevado teor de P_2O_5 . Além disso, o processo busca gerar cristais de sulfato de cálcio com alta filtrabilidade, maximizar os rendimentos da reação química e da filtração, e reduzir os custos de produção (GRUBER *et al.*, 2024).

2.2.2. A produção de ácido fosfórico

O ácido fosfórico é o segundo ácido mineral mais produzido globalmente, com um volume de produção de cerca de 36 milhões de toneladas por ano, ficando atrás apenas do ácido sulfúrico. O Brasil contribui com aproximadamente 1,2 milhão de toneladas por ano, que representa cerca de 3,3% da produção mundial, sendo que cerca de 88% dessa produção nacional é destinada ao setor de fertilizantes. Industrialmente, o H_3PO_4 pode ser produzido por duas diferentes rotas, denominadas de via úmida e via seca (COUTINHO; OLIVEIRA, 2023).

No processo via seca, o ácido puro é gerado a partir do fósforo elementar que é obtido pela redução do concentrado fosfático com coque e sílica, como exemplificado na Equação 3, em um forno elétrico, onde ocorre a redução da rocha fosfática a P elementar. Em seguida, o P elementar é oxidado a P_2O_5 e o ácido é obtido pela hidratação do óxido, geralmente denominado ácido fosfórico térmico (ULLMANN, 2016).

Esse método é mais caro e tem uma capacidade de produção menor, sendo empregado exclusivamente em aplicações que demandam alta pureza. As principais utilizações do ácido produzido por esse método incluem tratamento de metais (como eletropolimento e revestimento), ligante em materiais refratários, catalisadores, inseticidas, detergentes e como acidulante e aromatizante em alimentos e bebidas (ULLMANN, 2016).



Por meio do processo úmido, o ácido fosfórico é produzido diretamente a partir da rocha fosfática, como pode-se observar na Equação 2, utilizando um ácido mineral. Este método é conhecido pelo alto volume de produção, baixo custo e pureza relativamente baixa do ácido fosfórico. A digestão da rocha fosfática, geralmente, é realizada com ácido sulfúrico, porém o ácido nítrico ou o ácido clorídrico também são usados, com menor frequência. No entanto, as impurezas presentes nas rochas, como flúor, óxido de alumínio, óxido de ferro e dióxido de enxofre, limitam suas respectivas aplicações. Sendo assim mais de 90% do ácido fosfórico é produzido pela rota sulfúrica, e é majoritariamente utilizado na fabricação de fertilizantes (SOUZA, 2012).



Os processos industriais por via úmida são classificados de acordo com a forma de hidratação na qual o sulfato de cálcio cristaliza. A forma de hidratação do sulfato de cálcio é controlada principalmente pela temperatura e pela concentração de P_2O_5 no ácido. Quanto mais alta a temperatura de reação, menor o grau de hidratação do sulfato de cálcio. Assim os processos podem ser divididos em: Processo Anidro - CaSO_4 (processo sem aplicação industrial, dados os problemas de corrosão ocasionados pelas altas temperaturas requeridas para a cristalização da anidrita); Processo Hemihidrato - $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ e Processo di-hidrato - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

2.2.2.1. Processo di-hidrato

Devido a sua relativa simplicidade, o processo dihidratado é o mais usado no mundo pela indústria química para a produção de ácido fosfórico, sendo responsável por cerca de 90% do ácido fosfórico produzido mundialmente. O processo consiste em uma reação química entre a rocha fosfática e o ácido sulfúrico, resultando em ácido fosfórico e fosfogesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (CHAVES, 2021). As temperaturas de operação são baixas e o processo permite o uso de rocha úmida, apresentando elevada eficiência na recuperação de P_2O_5 (94-96%). No processo dihidrato de produção do ácido fosfórico, este é gerado a partir da reação do H_2SO_4 com o concentrado fosfático na granulometria adequada, alimentados em um reator juntamente com reciclo de ácido fosfórico diluído. O processo se desenvolve por uma sequência de reatores agitados ou reatores divididos em vários compartimentos como ilustrado na Figura 3 (SOUZA, 2012).

2.3. APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO

O fosfogesso apresenta alto impacto ambiental, devido, especialmente às grandes quantidades produzidas e à dificuldade de descarte apropriado. Com cerca de 4,5–5,5 toneladas de produção de fosfogesso durante o processamento de 1 tonelada de P_2O_5 , a produção anual é estimada em 100–280 milhões de toneladas (SICHENG LI, 2022).

Segundo Rossasi (2021), apenas 15% da produção mundial de fosfogesso é reutilizada como materiais de construção, fertilizantes agrícolas ou corretivos de estabilização do solo e como controlador de pega na fabricação de cimento Portland. Os 85% restantes são descartados sem qualquer tratamento. Este subproduto é geralmente despejado em grandes pilhas expostas a processos de intemperismo, ocupando áreas consideráveis de terra e causando sérios danos ambientais (contaminação química e radioativa), principalmente nas regiões costeiras.

Esse subproduto tem sido objeto de estudo em vários países, incluindo o Brasil, para explorar suas diversas aplicações. Entre elas, destacam-se a sua utilização na agricultura, em indústrias cimenteiras e em aterros sanitários (ARAÚJO, FERNANDES, 2014).

2.3.1. Agricultura

O gesso na agricultura, pode ser empregado como fonte de nutrientes – cálcio (Ca) e enxofre (S) – condicionador de subsuperfície, minimizando os efeitos da acidez do subsolo, além de atuar na correção de solos sódicos. Por ser um sal solúvel em água (sulfato de cálcio dihidratado – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), após sua aplicação no solo, o gesso pode liberar cálcio e enxofre, já que o produto

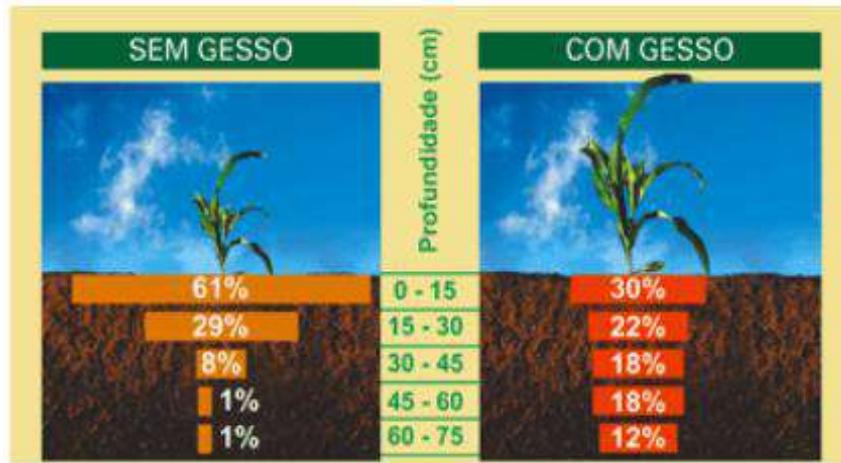
apresenta, em média, 19% de cálcio e 15% de enxofre, representando uma importante fonte desses nutrientes para as culturas (BRASIL *et al.*, 2020).

Dados os benefícios do emprego do $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nos solos, existe hoje no mundo um interesse considerável na exploração do potencial de aplicação de fosfogesso em terras agrícolas. Porém, este material contém certa quantidade de contaminantes, como fósforo solúvel (P_2O_5), flúor solúvel (F-), e substâncias radioativas como radionuclídeos naturais da série do urânio, como o ^{226}Ra e os seus produtos de decaimento ^{210}Pb e ^{210}Po , e ao mesmo tempo, alguns íons de metais pesados (Cr^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} e Cd^{2+}). Nesse sentido, é importante avaliar o impacto desses contaminantes para as culturas e até que ponto a radioatividade aparece nas culturas e contribui para a exposição humana à radiação (DALTO; PIZOL, 2022).

Alguns desafios significativos são enfrentados devido à baixa capacidade de retenção de água no solo, especialmente durante períodos de seca, além dos problemas de nutrientes e toxicidade em camadas mais profundas (ARAÚJO; FERNANDES, 2014).

O fosfogesso pode ser empregado como um condicionador de solo devido às suas várias características, como a elevada solubilidade, sendo cerca de 150 vezes maior que a do calcário, que possui apenas 0,0014 g/100g. Essa alta solubilidade permite que o fosfogesso penetre mais facilmente no perfil do solo, proporcionando uma série de benefícios, tais como: cálcio em profundidades maiores, a redução da toxicidade do alumínio nas camadas mais profundas, a promoção de um sistema radicular mais profundo de até 75 cm, a melhoria da captação de água e nutrientes do subsolo e uma maior resistência à seca por parte das plantas. A diferença nos sistemas radiculares das plantas com e sem o uso do fosfogesso é ilustrada na Figura 4 (BRASIL *et al.*, 2020).

Figura 4 - Sistemas radiculares das plantas com e sem aplicação de gesso agrícola.



Fonte: Agronelli Insumos Agrícolas.

Um estudo em uma plantação de café na cidade de Uberaba-MG, ao longo de três safras, avaliou a necessidade de irrigação quando o fosfogesso era aplicado e seu impacto na produtividade. Foram realizados seis tratamentos no solo, como exibidos abaixo, e os resultados relacionados à produtividade foram apresentados de forma resumida na Tabela 6.

- Tratamento 1, aplicação de 10 t. de fosfogesso por hectare com 100% de irrigação;
- Tratamento 2, aplicação de 10 t. de fosfogesso por hectare com 50% de irrigação;
- Tratamento 3, aplicação de 10 t. de fosfogesso por hectare sem irrigação;
- Tratamento 4, sem aplicação de fosfogesso com 100% de irrigação;
- Tratamento 5, sem aplicação de fosfogesso com 50% de irrigação;
- Tratamento 6, sem aplicação de fosfogesso sem irrigação.

Tabela 6 - Resultados de produtividade em sacas beneficiadas por hectare.

TRATAMENTOS	PRODUTIVIDADE		
	2006/2007	2007/2008	2008/2009
Fosfogesso + 100 % Irrigação	32,5	18,3	24,7
Fosfogesso + 50 % Irrigação	37,9	28,19	28,48
Fosfogesso / Sem Irrigação	23,2	13,67	9,43
Sem fosfogesso + 100 % Irrigação	29,6	13,78	12,6
Sem fosfogesso + 50% Irrigação	19,1	16,22	12,84
Sem fosfogesso / Sem Irrigação	17,9	3,03	7,35

Fonte: Adaptada de Wu et al. (2022).

Os resultados indicaram que a aplicação de fosfogesso na plantação de café resulta em uma economia de 50% no uso da água para irrigação, o que, consequentemente, reduz os custos principalmente relacionados à energia elétrica, com aumento da produtividade. Logo, os dados da Tabela 6 e a Figura 4 demonstram o mesmo resultado, ambos fazem uma comparação entre plantas com e sem a aplicação de gesso agrícola em relação à distribuição dos sistemas radiculares e obtêm o mesmo resultado.

Pode-se afirmar que o emprego de fosfogesso tem o potencial de se estabelecer como prática consolidada a longo prazo no cultivo em latossolos e solos similares nos trópicos, o que amplia as perspectivas de produção sustentável. É necessário aprimorar a contribuição brasileira com base em observações e monitoramento contínuos, visando maximizar os benefícios e mitigar quaisquer obstáculos, contribuindo assim para que se torne uma referência técnica mundial (MARCHI *et al.*, 2020).

2.3.2. Construção civil

A indústria da construção civil representa uma fatia importante da economia mundial, e a utilização de produtos reciclados pode ser uma alternativa viável para substituir matérias primas naturais tradicionalmente utilizadas. A construção civil tem potencial para absorção de grandes quantidades de resíduos. Nesse sentido, a utilização do fosfogesso por esse mercado poderia contribuir na redução dos grandes volumes de fosfogesso, podendo ser uma destinação ambiental e tecnicamente viável para esse resíduo (CHAVES, 2021).

De acordo com Fernandes *et al.* (2017), devido à semelhança com o gesso em suas propriedades físicas e químicas, o fosfogesso pode ser uma alternativa na fabricação de diversos materiais de construção, como placas de forro, painéis, tijolos, ladrilhos, molduras, painéis decorativos, divisórias, blocos pré-moldados, pisos e na composição de argamassas para revestimentos e como controlador de pega, na produção do cimento Portland.

Diante da abundância e da subutilização desse resíduo no Brasil, buscam-se alternativas economicamente viáveis para seu reaproveitamento. Há um crescente interesse em integrar o fosfogesso na indústria da construção civil, tanto para produzir materiais, como placas pré-fabricadas à base de fosfogesso, quanto para utilizá-lo como acabamento interno em casas populares em larga escala, o que poderia reduzir significativamente os custos de construção devido à disponibilidade abundante do material (CHAVES, 2021).

Segundo Campos (2023), o método Umedecimento Compactação e Secagem (UCOS) consiste no umedecimento do pó de gesso ou fosfogesso, seguido de homogeneização e compactação do pó úmido para a produção de pré-moldados. Esse processo envolve a hidratação do hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) com apenas 20% da massa de água em relação à sua própria massa, seguida de compactação e secagem a 50°C. Em comparação com o processo tradicional de colagem, que utiliza maior quantidade de água e requer secagem a temperaturas mais altas, o UCOS apresenta vantagens em termos de economia de água e energia, além de maior eficiência na produção dos pré-moldados.

Esse processo é capaz de produzir pré-fabricados à base de fosfogesso com resistência à compressão de até 100 MPa e resistência à tração de até 35 MPa. O autor também cita o uso de fosfogesso em base e sub-base de pavimentos urbanos e rodoviários. Nos Estados Unidos, trechos de rodovias foram construídos utilizando esse resíduo. Um exemplo de sucesso é visto na cidade de La Porte, no Texas, onde testes e monitoramentos realizados ao longo de 5 anos após a construção de um trecho da malha viária demonstraram que o pavimento ainda mantém uma boa capacidade de suporte sob tráfego intenso. Isso foi alcançado utilizando misturas de fosfogesso e cimento na base, com proporções de 90% e 10%, respectivamente (CAMPOS, 2023).

Costa *et al.* (2024) desenvolveram o aprimoramento do processo de neutralização do fosfogesso visando a utilização como regulador de pega, como fonte de sulfato de cálcio, na fabricação de cimentos Portland. Os principais aspectos investigados incluem o teor de cal sólida hidratada e o tempo de residência do fosfogesso tratado, pois através desses aspectos podem ser estudadas a eficiência do processo, controle da pega e ainda propriedades mecânicas e durabilidade. Diante desse cenário, pesquisas visam determinar a dosagem ideal de fosfogesso para sua incorporação como matéria prima alternativa na construção civil.

Uma das principais preocupações ambientais com seu uso como material de construção é a exalação de radônio. Um estudo realizado por Campos *et al.* (2017) foi capaz de medir a taxa de exalação de radônio de placas e tijolos fabricados com fosfogesso de três instalações do principal produtor brasileiro, a Vale Fertilizantes, e a Ultrafertil, a fim de avaliar o risco adicional à saúde dos moradores. Um método simples de acumulador envolvendo um tubo de PVC selado com uma tampa de PVC comercialmente disponível, com um detector de radônio CR-39 em uma câmara de difusão, foi utilizado para medir a taxa de exalação de radônio de placas e tijolos feitos de fosfogesso. Os resultados são observados na Tabela 7, comparando o fosfogesso da Bunge Fertilizantes com o fosfogesso da Ultrafertil.

Tabela 7 - Resultados das taxas de exalação de radônio.

Material	Fonte	Taxa de Exalação de Radônio (Bq m⁻² h⁻¹)
Placas	Bunge Fertilizantes	0,19 ± 0,06
	Ultrafertil	1,3 ± 0,3
Tijolos	Bunge Fertilizantes	0,11 ± 0,01
	Ultrafertil	1,2 ± 0,3

Fonte: Adaptado de Campos *et al.* (2017).

Os resultados obtidos no estudo de Campos *et al.* (2017) estão na mesma ordem de grandeza que os de materiais de construção comuns, o que indica que a reciclagem de fosfogesso como material de construção é uma prática segura, uma vez que não se espera nenhum risco adicional à saúde do ponto de vista radiológico.

2.3.2.1. Produção de cimento Portland

Cimento Portland é um tipo de cimento hidráulico amplamente utilizado como principal ingrediente na fabricação do concreto e argamassas. É composto, essencialmente, por uma mistura de clínquer, que consiste em materiais calcários e argilosos calcinados em altas temperaturas, e sulfato de cálcio, que regula o tempo de pega. O cimento Portland é conhecido por suas propriedades de endurecimento e resistência devido às reações químicas que ocorrem quando misturado com água, um processo denominado hidratação. Essas propriedades fazem dele um material indispensável em obras de engenharia, construção de edifícios, pavimentação de estradas, barragens e diversas outras aplicações estruturais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Globalmente, ele é utilizado na fabricação de componentes estruturais, não estruturais e funcionais de concreto para todos os tipos de edificações. Durante o processo de calcinação na produção do clínquer, o cálcio reage com outros elementos das matérias-primas para formar quatro compostos principais, que representam cerca de 90% da massa total do cimento. Embora os elementos sejam descritos na composição química como óxidos simples para padronização, eles geralmente não ocorrem dessa forma no cimento Portland (COSTA *et al.*, 2024).

Os principais compostos que formam o cimento são minerais resultantes da combinação de cálcio, sílica e alumina que são fundamentais na composição do clínquer, sendo estes a base do cimento Portland. Quando o clínquer é hidratado os produtos responsáveis pelo endurecimento e pela resistência do material são formados. São eles: silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), aluminato de cálcio hidratado (CAH) e ettringita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$) que influenciam diretamente as propriedades mecânicas e a durabilidade do cimento (COSTA *et al.*, 2024).

O cimento Portland é produzido em plantas próximas às pedreiras de calcário, que constituem cerca de 80% das matérias-primas utilizadas. Os 20% restantes são principalmente argila ou xisto, que fornecem os silicatos necessários. Caso esses materiais contenham altos níveis de aluminatos, adicione-se minerais de ferro ou outros compostos ricos em ferro para equilibrar a composição e evitar a formação em excesso de aluminato tricálcico. As matérias-primas são moídas até se tornarem um pó fino e, em seguida, queimadas em um forno rotativo a cerca de 1500°C . O clínquer resultante é misturado com 5 a 8% de gipsita, sendo novamente moído até atingir partículas menores que 20 micrões. A produção do cimento segue em linhas gerais a produção do clínquer, a mistura e moagem do clínquer com sulfato de cálcio e então a substituição parcial da mistura clínquer/sulfato de cálcio por materiais cimentícios suplementares, como argila calcinada, escória de alto forno e calcário moído (WEIKSNAR *et al.*, 2023).

Assim, dentre os constituintes básicos do cimento estão o clínquer e o sulfato de cálcio, tradicionalmente adicionado na forma de gipsita (MACHADO, 2024). A gipsita é adicionada ao cimento Portland para impedir a pega instantânea do aluminato tricálcico durante a hidratação do cimento. Em outras palavras, a gipsita é responsável por controlar a pega do cimento (COSTA, 2020).

O cimento Portland é classificado quanto a presença de materiais cimentícios suplementares que substituem o clínquer Portland e quanto a porcentagem de substituição realizada, como por exemplo os cimentos CP I, CP IIE e CP III, segundo a NBR 16697:

I. CP I - Cimento Portland Tipo I

Este é o cimento Portland tradicional, composto exclusivamente por clínquer e sulfato de cálcio, sem adição de materiais cimentícios suplementares. Devido à sua pureza, ele pode ser utilizado em construções gerais, onde não há necessidade de características específicas de

resistência a sulfatos ou calor de hidratação controlada. Esse tipo de cimento é adequado para a maioria das obras de concreto e alvenaria, pois proporciona alta resistência inicial e boa durabilidade.

II. CP II E- Cimento Portland Composto

CP II-E: Contém adição de escória granulada de alto forno (entre 6% e 34% do peso). Essa composição melhora a durabilidade, reduz a permeabilidade e torna o cimento mais sustentável, devido ao aproveitamento de resíduos industriais.

III. CP III - Cimento Portland de Alto-Forno

O CP III contém uma alta proporção de escória granulada de alto forno (entre 35% e 70%), tornando-o mais sustentável e econômico. Este cimento é conhecido por sua alta durabilidade: resistente a ataques químicos, como sulfatos e cloretos, tornando-o ideal para obras em ambientes agressivos, como portos, barragens e estações de tratamento de água. Além de apresentar baixo calor de hidratação: Adequado para grandes volumes de concreto, como em barragens, reduzindo riscos de fissuração.

Assim, o sulfato de cálcio é adicionado a todos os tipos de cimento produzidos nacionalmente e desempenha um papel fundamental na indústria do cimento, sendo amplamente utilizado como um controlador do tempo de pega. Sua função principal é controlar a velocidade de hidratação do cimento, permitindo que o material tenha tempo suficiente para ser trabalhado e aplicado antes da cura completa (COSTA *et al.*, 2024).

O fosfogesso também pode ser utilizado como fonte alternativa de sulfato de cálcio na produção de cimento. No entanto, o fosfogesso possui algumas impurezas, como elementos radioativos e metais pesados, que demandam tratamento adicional para atender aos padrões de segurança.

Comparado ao gesso, o fosfogesso pode apresentar um impacto ambiental mais significativo, especialmente se o seu envolvimento e descarte não forem adequados. A escolha entre gipsita e fosfogesso depende das regulamentações locais, disponibilidade de materiais e questões ambientais e de segurança. Em alguns contextos, o fosfogesso pode ser uma alternativa viável e sustentável a gipsita, contribuindo para a reciclagem de resíduos industriais (COSTA *et al.*, 2024). Segundo Chaves (2021) a aplicação do resíduo de fosfogesso tem sido considerável

na indústria cimenteira nacional, consumindo aproximadamente 1,7 milhões de toneladas de fosfogesso por ano.

Para ser utilizado na indústria cimenteira, o fosfogesso precisa atender a certos requisitos, incluindo índice de acidez superior a 4 e teor de ácido fosfórico (P_2O_5) menor que 0,8%. O pH ácido pode levar à despassivação das armaduras em estruturas de concreto armado e à redução da resistência inicial dos concretos. Por outro lado, um alto teor de P_2O_5 pode resultar em um aumento no tempo de pega dos cimentos produzidos (CHAVES, 2021).

A disponibilidade limitada da gipsita em certas regiões do país resulta em custos elevados e impactos ambientais significativos devido ao transporte em longas distâncias. Uma alternativa viável é substituir a gipsita por resíduos à base de sulfato de cálcio, como o fosfogesso. Esse resíduo pode conter impurezas que influenciam diretamente a hidratação do cimento, como fosfatos e fluoretos solúveis. Isso pode causar o retardamento nos tempos de pega e no desenvolvimento da resistência inicial dos materiais cimentícios (COSTA *et al.*, 2024).

Para enfrentar esses desafios, algumas estratégias foram exploradas para mitigar os efeitos adversos das impurezas do fosfogesso. Islâ *et al.* (2017) propuseram a previsão do uso do fosfogesso tratado como aditivo no cimento Portland. O fosfogesso bruto, proveniente de uma indústria de fertilizantes, foi submetido a um processo de tratamento para remoção do excesso de água e impurezas por meio de lavagem, secagem ao ar e secagem em forno. Posteriormente, foi adicionado ao cimento Portland em proporções variando de 2% a 15% em peso. O estudo avaliou o tempo de pega, a fluidez e a resistência à especificação de pastas, argamassas e concretos preparados com esse cimento modificado. Os resultados demonstraram que a adição de 5% a 10% de fosfogesso levou a um bom desempenho do material, melhorando suas propriedades. No geral, o processamento prévio do fosfogesso por lavagem e secagem aprimorado em um desempenho superior em todas as misturas comprovadas.

Costa *et al.* (2024) avaliaram a otimização do processo de neutralização do fosfogesso para sua aplicação como regulador de pega na produção de cimento Portland. Os principais parâmetros avaliados foram o teor de cal sólida hidratada e o tempo de residência do fosfogesso tratado, utilizando diferentes quantidades de cal hidratada (0%, 3% e 5%) e tempos de residência de 1, 3 e 7 dias. Em suma, os dados indicam a viabilidade de otimizar o fosfogesso tratado com cal como fonte de sulfato de cálcio em cimentos Portland.

A adição de cal hidratada em 3% e 5% ao fosfogesso resultou no aumento significativo do pH. Além disso, observou-se que tempos de residência inferiores a 7 dias podem ser aplicados no processo de tratamento do fosfogesso com cal. Quanto aos cimentos com fosfogesso tratado, notou-se que a cal hidratada desempenha papel crucial, promovendo reações de hidratação mais avançadas e maior resistência mecânica. De modo geral, os resultados indicaram que a cal hidratada exerceu importante influência na melhoria das propriedades das pastas de cimento produzidas com fosfogesso tratado.

Nesse contexto, o fosfogesso pode ser utilizado na produção de cimento Portland, desde que submetido a tratamentos adequados para remoção de impurezas e otimização de suas propriedades. O tratamento com cal hidratada e a lavagem e secagem do fosfogesso são etapas críticas para garantir que ele atue efetivamente como regulador de pega, substituindo a gipsita. A adição de 5-10% de fosfogesso tratado na pasta de cimento, levou a um bom desempenho, sendo observados melhores resultados quando o fosfogesso foi devidamente tratado para remover impurezas. A utilização do fosfogesso contribui para uma produção de cimento mais sustentável e econômica.

2.3.2.2. Gesso de revestimento

O gesso hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), é um dos ligantes mais antigos usados pela humanidade, produzido a partir de uma única matéria-prima, o mineral gipsita (sulfato de cálcio di-hidrato - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A desidratação da gipsita, sob certas condições de temperatura e pressão, resulta na formação de diversas fases, incluindo o hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), anidrita I (CaSO_4), anidrita II (CaSO_4) e anidrita III ($\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$) (LUTKE, 2023).

Devido às suas propriedades físicas e mecânicas, bem como ao baixo custo energético de produção, o gesso é amplamente utilizado na construção civil, principalmente para revestimento e acabamento de áreas internas, assim como na produção de placas e artefatos pré-moldados. No Brasil, é comumente empregado como pasta ou argamassa (gesso + agregado miúdo), sendo a qualidade do revestimento de gesso influenciada por vários fatores, incluindo a tecnologia de produção de gesso (LUTKE, 2023).

O gesso, resultante da calcinação da gipsita, é amplamente utilizado na indústria da construção civil para acabamento, revestimento e fabricação de pré-moldados. Ao considerar o revestimento interno de paredes, no contexto brasileiro, os principais materiais ligantes incluem cimento, cal e gesso. Tendo uma prevalência maior, porém, o emprego da argamassa de gesso

está gradualmente sendo equiparado pelo uso da argamassa de cimento para revestimento, oferecendo diversas vantagens (SCHADECK, 2017).

Um estudo de caracterização do gesso para revestimento feito por Ferreira (2019), demonstrou que o gesso aplicado em uma única camada, substitui as camadas tradicionais de emboço e reboco, resultando em uma redução na carga da parede. Além disso, requer menos massa corrida para o acabamento, o que diminui a necessidade de mão de obra durante a execução. O gesso também oferece propriedades isolantes térmicas e acústicas, e seu custo é geralmente mais baixo em comparação com outros ligantes, como o cimento. Todas essas vantagens podem se traduzir em benefícios econômicos significativos (LUTKE, 2023).

Por sua vez, o fosfogesso devido a semelhança com o gesso em relação às suas propriedades físicas e químicas, pode vir a ser um substituto na fabricação de placas de forro, painéis, divisórias, blocos pré-moldados, pisos e revestimentos (CHAVES, 2021). Constatada a abundância e a falha no aproveitamento e monitoramento desse resíduo, busca-se uma alternativa economicamente viável para o seu reaproveitamento, podendo o fosfogesso entrar na composição de material de vedação, de placas pré-fabricadas, assim como material de acabamento ou de revestimento interno na construção de casas populares em grande escala. Essa prática poderia baratear sensivelmente o custo da construção devido à grande disponibilidade do material (CHAVES, 2021).

Schadeck (2017) investigou a viabilidade técnica e econômica de fabricar materiais de construção utilizando fosfogesso como substituto total ou parcial da gipsita. As principais etapas incluíram a caracterização físico-química e morfológica do gesso e do fosfogesso, o desenvolvimento de um processo eficiente para beneficiar o fosfogesso visando seu uso na construção civil, a avaliação das propriedades físicas e mecânicas das misturas de fosfogesso e gesso e a contribuição com dados técnicos e científicos para a regulamentação ambiental do uso do fosfogesso. O estudo concluiu que o fosfogesso, tanto beneficiado quanto em sua forma natural, apresenta composição semelhante ao gesso tradicional, a diferença é mínima e se deve principalmente à presença residual de elementos químicos como fósforo e terras raras.

Qin (2023) investigou o fosfogesso em testes de tempo de pega. Observou-se que composições com 100% de fosfogesso beneficiado não são adequadas para fabricação de artefatos e revestimento de paredes devido ao tempo prolongado necessário para atingir o fim da pega. No entanto, substituições menores de fosfogesso pelo gesso tradicional proporcionam tempos de pega dentro das faixas recomendadas pelos padrões da indústria e pelos requisitos do

mercado consumidor. Além disso, o comportamento das misturas contendo apenas gesso e aquelas com substituição por fosfogesso foi semelhante, indicando a viabilidade do uso do fosfogesso beneficiado como matéria-prima na fabricação de materiais de construção.

2.3. LIMITAÇÕES DO EMPREGO DO FOSFOGESSO

Entre os minerais presentes nas rochas fosfáticas, frequentemente encontram-se elementos radioativos, como o urânio, e terras raras, que se acumulam no fosfogesso durante o processamento. Esses contaminantes, ainda que em concentrações baixas, ficam retidos no resíduo devido à natureza do processo químico de extração, conferindo ao fosfogesso características que demandam cuidados específicos de manuseio e disposição (TCHERNICHÉ *et al.*, 2021).

A presença de terras raras e urânio, por exemplo, contribui para a radioatividade natural do fosfogesso e para a presença de metais pesados, tornando-o um material que, embora classificado como não perigoso, requer atenção quanto ao seu potencial de impacto ambiental. Portanto, entender a origem mineral do fosfato e a presença desses elementos é essencial para a correta categorização e gestão do fosfogesso, permitindo medidas que minimizem seu potencial de contaminação e assegurem uma disposição final que atenda às regulamentações ambientais (TCHERNICHÉ *et al.*, 2021).

Assim, a principal limitação da reutilização do fosfogesso consiste na presença de contaminantes, que podem alterar propriedades físico-químicas do material ou do meio ao qual é adicionado. Estes contaminantes são oriundos da composição da rocha fosfática ou do processo de obtenção do ácido fosfórico, e podem ser incluídos resíduos de ácido sulfúrico e fosfórico, metais pesados e elementos radioativos, como será discutido a seguir.

Inicialmente, o fosfogesso é altamente ácido. O pH se encontra em uma faixa de 2 a 3 como ilustrado na Figura 5, devido à presença de ácido fosfórico residual. Este consiste principalmente em sulfato de cálcio di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), e contém impurezas como fluoretos, sulfatos, radionuclídeos naturais, metais e outros oligoelementos (OLIVEIRA, 2014).

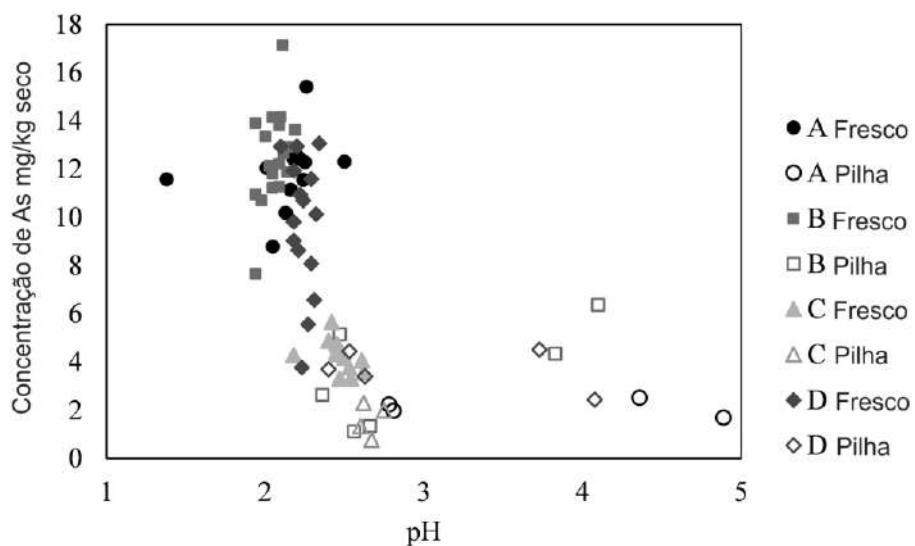
Weiksnar *et al.* (2023) realizaram um estudo acerca das mudanças nas concentrações de vestígios de metais ao longo do ciclo de vida do fosfogesso. Foram conduzidas análises em amostras de fosfogesso de quatro fontes distintas do sudeste dos EUA, visando explorar a

variação no teor total de metais entre o fosfogesso recém-gerado (fresco) e o fosfogesso armazenado em pilhas por diferentes períodos.

Os resultados revelaram que o fosfogesso fresco apresentou concentrações totais de metais mais elevadas em comparação com o fosfogesso armazenado, incluindo aqueles identificados na literatura como relevantes para a avaliação de riscos, como Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Chumbo (Pb) e Zinco (Zn). Esses metais apresentam toxicidade e causam danos ao solo, à água e aos alimentos quando utilizados na agricultura. Os autores observaram ainda uma variação no pH entre o fosfogesso fresco e o armazenado. Amostras frescas de fosfogesso apresentaram pH inferior a 3, enquanto amostras armazenadas exibiram pH entre 2,5 e 5, aproximadamente, como exibido na Figura 5.

As amostras armazenadas com pH semelhante às amostras frescas apresentaram concentrações mais baixas de metais totais, sugerindo que fatores como a drenagem da água do processo e a localização da pilha podem influenciar o pH do fosfogesso armazenado e as concentrações totais de metais. Em geral, observou-se que o armazenamento do fosfogesso por três ou mais anos antes da reutilização beneficia a redução das concentrações totais de metais em comparação com o fosfogesso fresco.

Figura 5 - Concentração total de As versus pH em amostras de fosfogesso.



Fonte: Adaptado de Weiksnar K. D. *et al.* (2023).

À medida que o fosfogesso é armazenado e se desidrata ao longo do tempo, sua acidez diminui gradualmente. Além disso, as pilhas de fosfogesso podem liberar gás radônio e compostos de flúor (SiF_4 , HF) em quantidades significativas na atmosfera. Evidências sugerem

que a principal preocupação relacionada às pilhas de fosfogesso é a emissão de ^{222}Rn , um produto do decaimento alfa de ^{226}Ra . Em áreas expostas a fortes correntes de vento, a dispersão de partículas finas de fosfogesso também deve ser considerada (HENTATI, 2015).

Algumas impurezas presentes no fosfogesso podem influenciar as propriedades de materiais à base de cimento, como concretos e argamassas, especialmente causando redução na resistência mecânica inicial e o retardamento no tempo de pega. Os contaminantes presentes no fosfogesso que podem influenciar estas propriedades incluem fosfatos, fluoretos, metais pesados como cádmio e chumbo, materiais orgânicos e excesso de sulfatos. Esses contaminantes reagem com os componentes do cimento, alterando as propriedades físicas e mecânicas do produto final (OLIVEIRA, 2014).

Os fosfatos podem retardar o tempo de pega do cimento, dificultando a solidificação inicial, enquanto os fluoretos influenciam negativamente a resistência mecânica inicial do concreto e da argamassa. Metais pesados, como cádmio e chumbo, podem interferir nas reações químicas do cimento, resultando em variações na resistência e durabilidade. A presença de compostos orgânicos pode retardar o tempo de pega e afetar a resistência inicial. Além disso, o excesso de sulfatos pode causar expansão e fissuração, afetando a resistência do material final (QIN *et al.*, 2023).

2.4.1. Contaminantes

Quando os contaminantes são encontrados em concentrações acima dos limites recomendados pela norma NBR 10.004 - Classificação de Resíduos Sólidos, eles se tornam poluentes e representam riscos, como a contaminação de solos e mananciais de água, próximos aos depósitos de fosfogesso. Além dos metais pesados, compostos químicos como sílica (SiO_2), óxidos de ferro (Fe_2O_3), alumínio (Al_2O_3) e magnésio (MgO) também podem estar presentes (CHAVES, 2021).

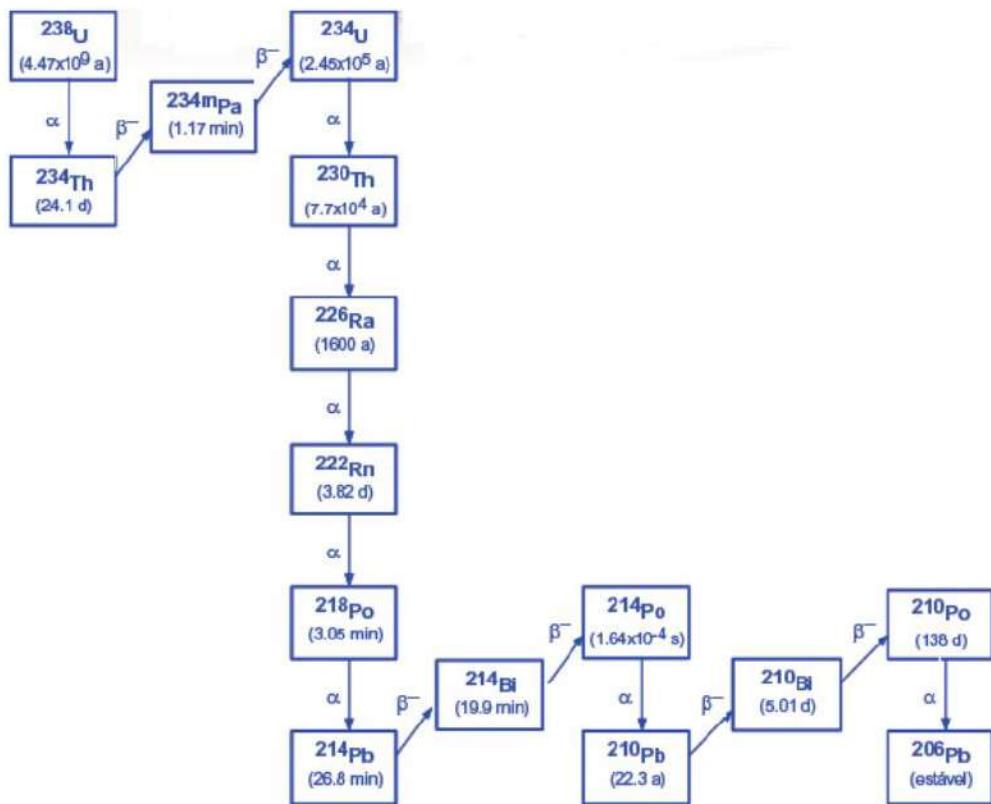
Weiksnar *et al.* (2023) investigaram as concentrações de oligoelementos entre amostras de fosfogesso fresco e empilhado em quatro instalações no sudeste dos Estados Unidos. As concentrações totais de elementos no fosfogesso empilhado foram mais baixas em comparação com o fosfogesso fresco para os elementos de interesse identificados na literatura (As, Cd, Cr, Cu, Pb e Zn), como previamente mencionado. Essa relação não dependia do pH ou da idade, mas

sim de outros fatores, incluindo a localização na pilha, condições de drenagem e acesso da água da chuva na pilha ou dentro dela.

O fosfogesso fresco apresentou concentrações totais de elementos significativamente mais altos do que o fosfogesso empilhado para As, Cd, Cr, Cu, Pb e Zn em pelo menos duas instalações. As concentrações mais altas de metais pesados no fosfogesso fresco, em comparação ao fosfogesso empilhado, ocorrem devido a processos como lixiviação, intemperismo e reações químicas que ocorrem ao longo do tempo no armazenamento. A exposição à água e ao ar permite a dissolução e remoção gradual desses metais, enquanto alguns elementos formam compostos menos solúveis e são redistribuídos dentro da pilha ou fixados no solo ao redor. Com o tempo, estes processos reduzem a reatividade química do fosfogesso, estabilizando e diminuindo as concentrações dos metais tóxicos no material empilhado (WEIKSNAR *et al.*, 2023).

Do ponto de vista da reutilização, o uso de fosfogesso empilhado pode ser uma alternativa mais viável do que a amostragem direta de fosfogesso fresco da planta, pois ajuda a reduzir o risco de exposição direta. Embora o arsênio (As) tenha excedido os níveis regulatórios em algumas amostras, nenhuma ultrapassou os limites comerciais para exposição direta (WEIKSNAR *et al.*, 2023). Controles institucionais ou de engenharia, como encapsulamento ou mistura com outros materiais, podem reduzir ainda mais os riscos. Selecionar fosfogesso de locais de drenagem preferenciais ou de empilhamento otimizado pode eliminar grande parte do risco de exposição direta ao reciclar ou aplicar no solo (WEIKSNAR *et al.*, 2023). Os minérios apatíticos frequentemente carregam quantidades significativas de urânio, tório e outros elementos radioativos pertencentes às suas principais cadeias de decaimento. Nas próprias rochas fosfatadas, os diversos membros da série natural do Urânio (^{238}U), Tório (^{232}Th) e seus produtos de decaimento permanecem em equilíbrio radioativo, o decaimento do Urânio (^{238}U) pode ser visto na Figura 6 (OLIVEIRA, 2014).

Figura 6 - Série de decaimento do ^{238}U

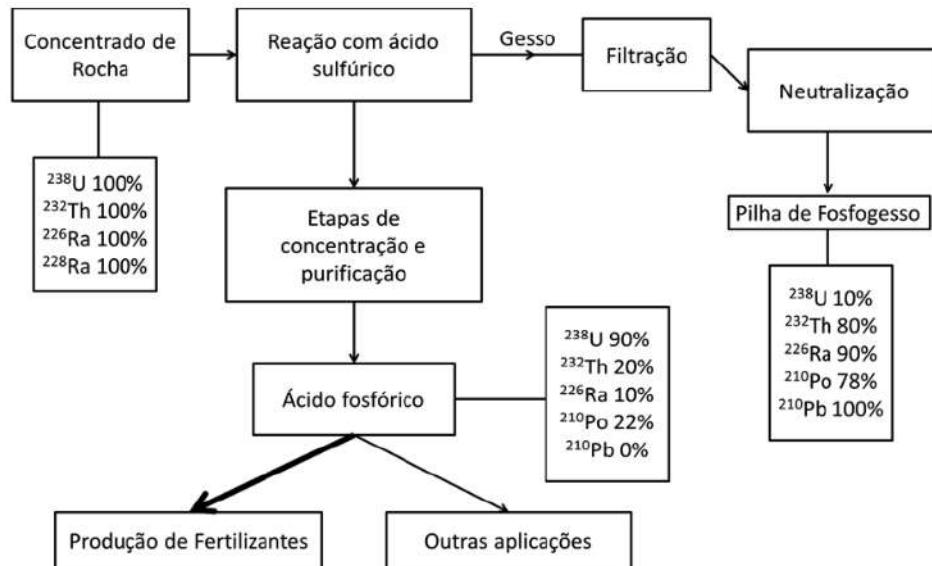


Fonte: Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM (2014)

Contudo, durante o processo de digestão da rocha, empregado em plantas que adotam o método via úmida para a produção de ácido fosfórico, esse equilíbrio é rompido, resultando na redistribuição dos radionuclídeos. Aproximadamente 86% do ^{238}U e 70% do ^{232}Th são incorporados ao fertilizante, enquanto cerca de 80% do ^{226}Ra é direcionado ao fosfogesso, como exibido na Figura 7. Os elementos presentes na rocha matriz são redistribuídos entre os produtos intermediários, finais e subprodutos, incluindo a série de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th . O gás radônio ^{222}Rn , resultante do decaimento do ^{226}Ra , uma impureza comumente presente no fosfogesso, pode representar um risco radiológico significativo quando este é utilizado como material de construção, especialmente em ambientes com baixa ventilação, devido à sua exalação (DNPM, 2014).

Os isótopos de urânio tendem a migrar para o ácido fosfórico na forma de complexos de fosfato de uranila, sulfato e fluoreto. Estes elementos são os principais responsáveis pela exposição interna do ser humano à radiação ionizante ao longo da vida, sendo o radônio especialmente preocupante por seu potencial cancerígeno quando inalado (OLIVEIRA, 2014).

Figura 7 - Fluxo e distribuição dos radionuclídeos no processo de extração com H_2SO_4 .



Fonte: Oliveira (2014).

Rossasi (2021) avaliou a concentração de ^{222}Rn em argamassa de gesso/fosfogesso e argamassa de cimento com diferentes composições, o que permitiu inferir a concentração de atividade do ^{226}Ra . Os valores encontrados para a concentração de atividade do ^{226}Ra , tanto para argamassa de gesso/fosfogesso quanto para as argamassas de cimento, foram estatisticamente equivalentes. Os encontrados estavam abaixo do limite estabelecido pela norma CNEN nº 147 de 1000 Bq/kg para a atividade do ^{226}Ra na indústria cimenteira, demonstrando que não havia restrições evidentes para o uso desses materiais na indústria (BOUARGANE, 2023).

Os resultados demonstraram que apesar da presença desses contaminantes, o fosfogesso não chegou a ser classificado como resíduo tóxico devido à sua não corrosividade e às concentrações médias totais de elementos tóxicos (Ba, As, Cr, Cd, Hg, Pb, Se e Ag) estarem abaixo dos critérios permitidos pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) para resíduos tóxicos perigosos (BOUARGANE, 2023).

Segundo Rashad (2017), a reciclagem do fosfogesso como material de construção não apresenta riscos adicionais à saúde do ponto de vista radiológico. A pesquisa envolveu a análise da poluição causada pelo fosfogesso antes e depois de sua incorporação em pasta de cimento na proporção de 4/1. Os resultados mostraram que a adição de fosfogesso nas amostras de preenchimento reduziu significativamente a liberação de flúor (F), fósforo (P) e metais, além de diminuir o risco de difusão de poluentes. A principal barreira para o uso comercial do fosfogesso

residia na presença desses elementos radioativos e impurezas, que prolongam o tempo de endurecimento e reduzem a resistência mecânica.

2.4.2. Pré-tratamentos necessários

O processo mais comum de tratamento do fosfogesso envolve uma combinação de métodos químicos, físicos e térmicos para separar e extrair elementos críticos, como os elementos de terras raras (REEs), metais pesados e radionuclídeos. Esses métodos são eficazes na remoção das impurezas e elementos tóxicos presentes neste subproduto. Com o pré-tratamento adequado para o uso do fosfogesso na construção civil, como flotação, calcinação e lavagem com soluções ácidas, o fosfogesso pode ser utilizado em substituição ao gesso (BOUARGANE, 2023).

As tecnologias para utilizar o fosfogesso em materiais e produtos de construção consistem na preparação do resíduo para a produção de ligantes de gesso e podem ser divididas em quatro métodos: i) lavagem com água, ii) lavagem combinada com neutralização e deposição de impurezas em suspensão aquosa, iii) decomposição térmica de impurezas e iv) introdução de aditivos que neutralizam, mineralizam e regulam a cristalização antes e depois da queima (TCHERNICHÉ *et al.*, 2021).

Alguns tratamentos analisados por Rashad (2017) e por Bouargane (2023), envolvem métodos para remover as impurezas do fosfogesso bruto. Estes incluem lavagem, peneiramento úmido, tratamento com uma combinação de sílica e ácido sulfúrico ou soluções aquosas quentes de sulfato de amônio, neutralização com cal e tratamentos térmicos:

1. Cal + Flotação

A adição de cal (óxido de cálcio) e o processo de flotação são eficazes na redução do conteúdo de fósforo e flúor no fosfogesso. A cal pode reagir com o fósforo e flúor, formando compostos menos solúveis que podem ser facilmente separados do fosfogesso. A flotação é um método físico-químico onde bolhas de ar são introduzidas na suspensão de fosfogesso, fazendo com que as impurezas, incluindo o fósforo e o flúor, sejam levadas à superfície e removidas. Este método utiliza a adição de cal para neutralizar impurezas seguido pela flotação para separação de partículas indesejáveis. Apesar de ser moderado em custo e complexidade, a pureza alcançada é alta, sendo adequada para uso na fabricação de cimento. Os resíduos gerados são simples e de baixo impacto ambiental.

2. H₂SO₄

O uso de H₂SO₄ para extrair os elementos de terras raras é um método de tratamento eficaz, econômico e útil. O fosfogesso purificado resultante apresenta concentrações insignificantes de impurezas, inferiores a 0,02% em peso. Este método permite a limpeza de impurezas com uma pureza extrema no fosfogesso. É altamente eficaz na produção de cimento de qualidade superior, mas apresenta custos elevados, alta complexidade e impacto ambiental significativo devido aos resíduos ácidos gerados. Apesar disso, é uma das melhores opções para atender aos padrões mais exigentes da construção civil.

3. HNO₃ + NaNO₃ + fosfato de tributila (TBP)

O flúor e os elementos de terras raras podem ser removidos do fosfogesso utilizando HNO₃, juntamente com NaNO₃, em conjunto com fosfato de tributila (TBP). Foi verificado que uma combinação de recristalização e aplicação de membrana pode remover até 90% dos metais pesados e lantanídeos encontrados no fosfogesso. Este método é considerado muito eficaz, porém apresenta alto custo e geram resíduos ácidos e moderados, tornando-os menos viáveis em larga escala para a construção civil.

4. Água do Mar

A água do mar também pode ser utilizada para eliminar vestígios de cádmio do fosfogesso, pois o cádmio pode ser solubilizado na água salgada e removido durante o processo de lavagem. No entanto, é importante notar que a salinização excessiva da água do mar pode resultar no acúmulo de grandes quantidades de sais no fosfogesso purificado. Isso pode afetar sua aplicação em indústrias que requerem gesso de alta pureza. É um método simples e econômico, mas sua eficácia é limitada devido à salinidade dos resíduos gerados, que pode comprometer a qualidade do fosfogesso para o cimento.

5. Zeólita Hidrosodalita

A adição de uma mistura contendo Na₂O, Al₂O₃, SiO₂ e água, conhecida como zeólita hidrosodalita, é uma técnica utilizada para neutralizar as impurezas ácidas presentes no fosfogesso. Esta mistura reage com os componentes ácidos no fosfogesso, ajudando a estabilizar suas propriedades químicas e físicas. A zeólita hidrosodalita atua como um agente neutralizante, reduzindo a acidez do fosfogesso ao reagir com os ácidos residuais, como ácido sulfúrico e ácidos

orgânicos. Essa reação resulta na formação de compostos menos solúveis e mais estáveis, contribuindo para melhorar as características do fosfogesso. Este método, embora eficaz e ambientalmente estável, apresenta complexidade e custo moderado e pode limitar sua adoção em larga escala.

6. Água destilada

Sais solúveis, metais pesados, fluoretos, materiais orgânicos e íons de fósforo presentes no fosfogesso foram removidas por técnicas simples de lavagem com água destilada, por meio de três a cinco lavagens com água em uma proporção de 2 ml de água para cada grama de fosfogesso. Impurezas indesejáveis foram consideravelmente reduzidas neste método. Este método é simples e econômico, capaz de remover impurezas como metais pesados, fluoretos e íons de fósforo. Realizando entre três e cinco lavagens, alcança-se um fosfogesso com pureza suficiente para uso na construção civil. Esse método tem impacto ambiental muito baixo e é de fácil aplicação, sendo ideal para regiões com recursos limitados. Na Tabela 8 podemos observar de forma objetiva e comparar os métodos para tratamento do fosfogesso (RASHAD, 2017; BOUARGANE, 2023).

MÉTODOS	Custo	Complexidade	Eficácia	Implicações Ambientais
Cal + Flotação	Moderado	Média	Alta	Impacto moderado
H_2SO_4	Alto	Alta	Muito alta	Impacto elevado
$HNO_3 + NaNO_3 + TBP$	Alto	Alta	Muito alta	Impacto elevado
Água do Mar	Baixo	Baixa	Moderada	Salinização de resíduos
Zeólita Hidrosodalita	Moderado	Média	Alta	Impacto mínimo
Água destilada	Baixo	Baixa	Alta	Impacto mínimo

Tabela 8 - Comparação entre os métodos de tratamento do fosfogesso.

Fonte: Elaborada pela autora.

O melhor método para aplicação na construção civil é a lavagem com água destilada, devido ao seu baixo custo, simplicidade e eficácia na remoção de impurezas, resultando em um fosfogesso de qualidade para o cimento com impacto ambiental mínimo. Como segunda opção, o método com H_2SO_4 é recomendado pela alta pureza alcançada, especialmente quando são exigidos padrões mais rigorosos, embora exija um maior investimento financeiro e cuidado ambiental.

2.5. IMPACTOS AMBIENTAIS DO FOSFOGESSO

A presença de compostos radioativos no fosfogesso tem sido avaliada em diversas pesquisas, especialmente no que se refere ao estudo de isótopos radioativos como ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{232}Th e ^{40}K , entre outros. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) distribuiu em 1000 Bq/kg o limite máximo de atividade para os isótopos ^{228}Ra e ^{226}Ra em fosfogessos destinados ao uso na agricultura e na indústria cimenteira (CNEN, 2014).

Os níveis de radioatividade no fosfogesso podem variar significativamente, dependendo da origem do depósito de rochas fosfatadas utilizadas na produção do ácido fosfórico. Essas rochas apresentam uma maior associação com elementos radioativos, como o urânio e o tório, o fosfogesso gerado também contém concentrações mais elevadas desses elementos. Por exemplo, o fosfogesso proveniente de Santa Quitéria (CE), onde há presença significativa de urânio nas rochas fosfatadas, tende a apresentar níveis de radioatividade mais altos do que aquele oriundo da Serra do Salitre (MG), onde a associação com elementos radioativos é menor. Portanto, é essencial considerar a origem do material para avaliar sua segurança e soluções para uso na construção civil, podemos observar na Tabela 9 a radioatividade de fosfogesso em diferentes países (COSTA, 2020).

Tabela 9 - Radioatividade de fosfogesso em diferentes países.

ISÓTOPOS RADIOATIVOS	BRASIL	CHINA	EGITO	MARROCOS
^{232}Th	$17,43 \pm 0,21$	94,91	Não detectado	Não detectado
^{226}Ra	$18,34 \pm 0,34$	56,3	461 ± 12	513,3
^{40}K	Não detectado	708,79	Não detectado	109

Fonte: Adaptado de COSTA (2020).

A presença de radionuclídeos em rochas fosfáticas e, consequentemente, em fosfogesso, é um fato bem documentado. No entanto, o uso desse material é controverso, com legislações específicas variando entre países. Alguns permitem seu aproveitamento em outros setores sob restrições, enquanto outros proíbem seu uso. No Brasil, o fosfogesso é classificado como um material inerte e não perigoso (Classe II B), de acordo com a NBR 10004 (2004). Nos Estados Unidos, a USEPA (United States Environmental Protection Agency) (USEPA, 2002) proibiu o uso de fosfogesso com radioatividade superior a 370 Bq/kg, enquanto no Brasil, o limite aceito é de até 1000 Bq/kg (COSTA, 2020).

As estratégias atualmente adotadas pela indústria de fosfato para lidar com o fosfogesso incluem: (i) descarte em corpos d'água; (ii) deposição em cavas de mineração; (iii) armazenamento a seco; e (iv) armazenamento a úmido. No entanto, todas essas soluções acarretam sérios impactos ambientais que podem resultar na contaminação do solo, da água e dos ecossistemas circundantes, representando riscos para a saúde humana e ambiental (HENTATI, 2015).

O passivo ambiental é definido como o dano ambiental acumulado resultante de atividades humanas, podendo exigir a alocação de recursos para sua recuperação e mitigação. Ele pode ser causado por práticas inadequadas de gestão ambiental, impacto de processos produtivos ou falta de medidas preventivas, representando um desafio para garantir o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental. Empresas que não adotam medidas preventivas e corretivas para minimizar os danos ambientais que causam e que não cumprem as normas estabelecidas por lei, podem ser multadas por infrações, ser obrigadas a recuperar ou restaurar áreas degradadas, podendo inclusive ser interditadas pelo governo em casos de infrações graves ou reincidentes (ARAÚJO; FERNANDES, 2014).

A maneira de obter informações sobre o passivo ambiental de uma empresa é padronizada em todos os estados e regulamentado pela Resolução CONAMA 001/1986. O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA), são requisitos obrigatórios para o licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades que possam gerar impactos ambientais significativos (PNLA, 2018). Dado o volume de material gerado e suas características físico-químicas, o armazenamento e o descarte do fosfogesso consistem em questões de extrema relevância ambiental para as empresas e sociedade, devido aos seguintes motivos (TCHERNICHÉ *et al.*, 2021):

- I. O armazenamento de fosfogesso nas instalações industriais deteriora as condições sanitárias locais e do entorno;
- II. O transporte e armazenamento de fosfogesso em depósitos de resíduos implicam custos consideráveis, representando cerca de 18% do custo total de construção das instalações de produção de ácido fosfórico, esses custos aumentam significativamente ao considerar uma transição para um transporte hidráulico mais confiável do fosfogesso. O transporte hidráulico consiste em mover materiais sólidos, misturando-os com água para formar uma polpa, que é transportada por tubulações. Ele reduz poeira e pode ser mais eficiente em longas distâncias, mas aumenta os custos devido à necessidade de sistemas de bombeamento e tratamento da água;
- III. Os custos operacionais dos depósitos de resíduos de fosfogesso correspondem a aproximadamente 12% do custo total de processamento das matérias-primas;
- IV. A necessidade de dedicar grandes áreas para a criação de depósitos de resíduos podem até superar em tamanho as próprias instalações industriais;
- V. A operação dos depósitos de resíduos representa uma ameaça potencial ao meio ambiente e às paisagens residenciais adjacentes.

Verifica-se, desta forma, que existem considerações específicas que devem ser levadas em conta ao escolher um método para remover e armazenar o fosfogesso em aterros industriais. Estas considerações envolvem a capacidade de produção, a quantidade de fosfogesso a ser removida, a distância dos componentes de extração ao local de armazenamento do fosfogesso, disponibilidade de terrenos para armazenamento, topografia do aterro industrial, condições climáticas, condições geológicas e hidrogeológicas no local de armazenamento do fosfogesso (TCHERNICHÉ *et al.*, 2021).

A problemática do descarte do fosfogesso permanece relevante por diversas razões: o armazenamento do fosfogesso nas instalações industriais degrada as condições sanitárias locais e nas áreas vizinhas. O transporte e armazenamento do fosfogesso em aterros industrial implicam custos consideráveis, representando aproximadamente 18% do custo total de construção da unidade de produção de ácido fosfórico (WEI e DENG 2022).

Além disso, esses custos operacionais aumentam significativamente ao migrar para métodos mais confiáveis de transporte hidráulico de fosfogesso, correspondendo a cerca de 12% do custo de processamento das matérias-primas; a alocação de vastas áreas para a criação de aterros industriais é necessária, podendo exceder o tamanho das próprias instalações industriais,

bem como, a operação dos aterros industriais representa uma ameaça potencial ao meio ambiente e às comunidades residenciais próximas. É importante ressaltar que a valorização do fosfogesso ainda enfrenta limitações, principalmente devido aos custos elevados associados à sua remoção (WEI e DENG 2022).

Pesquisas conduzidas em todo o mundo indicam que, do total de fosfogesso produzido, 58% são armazenados, 28% são descartados em lagoas de sedimentação e apenas 14% são submetidos a reprocessamento (ARAÚJO; FERNANDES, 2014). De acordo com a pesquisa de Fernandes *et al.* (2017), existem principalmente três métodos de destinação final de fosfogesso:

1. Retorno à mina de extração de fosfato;
2. Empilhamento em áreas próximas às instalações de produção;
3. Descarregamento em rios e oceanos;

O retorno à mina só é viável economicamente quando a unidade de produção de ácido fosfórico está próxima. Um exemplo é uma instalação na Carolina do Norte, nos Estados Unidos, que utiliza essa prática reintegrando o fosfogesso à terra argilosa caulinítica, essa abordagem elimina preocupações ambientais, especialmente porque a mistura de fosfogesso e argila é geoteticamente estável. É importante destacar que essa solução é específica para esse tipo de integração entre mina e fábrica de ácido fosfórico. Já o empilhamento e o descarte em rios e oceanos serão discutidos nos próximos tópicos.

2.5.1. Destinação final: Empilhamento

Empilhar o fosfogesso em áreas próximas à unidade de produção de ácido fosfórico é o método mais comumente adotado pelas indústrias. O empilhamento requer grandes áreas de armazenamento, que devem ser devidamente impermeabilizadas, e duas principais formas de disposição podem ser escolhidas: a via úmida e a via seca. A escolha entre uma ou outra forma de disposição depende de uma variedade de fatores, incluindo econômicos, ambientais e políticos (BOUARGANE, 2023).

Segundo Fernandes *et al.* (2017), na abordagem de via seca o fosfogesso é transportado diretamente das operações de filtração, na forma de torta, para as pilhas de armazenamento por meio de correias transportadoras ou caminhões. Essa torta possui cerca de 30% de umidade e contém teor residual de P_2O_5 de aproximadamente 0,5 a 1,0%. Já na via úmida, o fosfogesso é transportado em suspensão, com cerca de 80% de umidade, composta de água e ácido residual

proveniente da torta de filtração do ácido fosfórico. Essa suspensão é bombeada para lagoas de sedimentação, onde o fosfogesso é decantado e posteriormente retirado por escavadeiras tipo *dragline* para ser depositado nas pilhas de armazenamento.

As lagoas de sedimentação possuem diques de contenção construídos com o próprio fosfogesso, sendo utilizadas de forma alternada. As águas ácidas drenadas, provenientes do *overflow* da sedimentação, são coletadas em canais e direcionadas para lagoas de processo. Estas também recebem águas pluviais e passam por processo de evaporação solar, além de resfriar as águas de processo. Posteriormente, devido ao residual de P_2O_5 , essas águas são reintroduzidas no processo de produção de ácido fosfórico. Caso haja excesso de água, ela é encaminhada para a estação de tratamento para posterior descarte. No Brasil, ambos os métodos de disposição de fosfogesso são empregados pelos fabricantes de ácido fosfórico (ARAUJÓ; FERNANDES, 2014).

2.5.1. Destinação final: Mar

A prática de descarregar fosfogesso em corpos d'água é adotada por poucas indústrias de ácido fosfórico em todo o mundo, e vem sendo gradualmente abandonada devido ao impacto ambiental nas áreas próximas ao ponto de descarga. A escolha do método de disposição depende da disponibilidade de áreas apropriadas, da localização da unidade produtora, da legislação local e do relacionamento com a comunidade local e ambiental. Embora alguns resíduos da indústria sejam tratados como coprodutos devido ao seu valor comercial e reutilização em outros setores, o fosfogesso não compensa seu custo de disposição através da comercialização. Isso leva a uma tendência de optar por soluções mais baratas, que nem sempre são as melhores em termos ambientais ou de longo prazo (BOUARGANE, 2023).

A maioria das plantas de ácido fosfórico no mundo não está localizada próxima a corpos d'água capazes de receber a carga de fosfogesso de forma econômica ou politicamente viável, sem causar grandes impactos ambientais. Do ponto de vista ambiental, os impactos dessa prática ainda não foram completamente avaliados (COSTA, 2020).

A solubilidade do sulfato de cálcio em água à temperatura ambiente é de aproximadamente 2,5 g/L, e na água do mar é de cerca de 3,5 g/L. Quando descarregado em mar aberto com correntes marítimas, o sulfato de cálcio tende a se dispersar lentamente, dissolvendo-se e causando pouca alteração na concentração de elementos químicos contidos no corpo d'água. Além disso, essa prática pode contribuir para a redução da influência de metais pesados,

fluoretos, radionuclídeos e ácidos presentes na lama de fosfogesso, devido à sua diluição, diminuindo a concentração desses compostos. No entanto, ainda são necessários estudos de longo prazo para avaliar de forma consistente os impactos no ambiente próximo às descargas das plantas que adotam essa alternativa (FERNANDES *et al.*, 2017).

As unidades produtoras no Marrocos e na África do Sul realizam essa descarga no Oceano Atlântico, bombeando uma lama de fosfogesso resultante da mistura da torta dos filtros com água do mar. Isso é possível porque a carga descarregada é diluída e lançada em áreas com fortes correntes marítimas e em costas desabitadas, minimizando os problemas ambientais. No entanto, a descarga em rios e oceanos próximos a áreas habitadas não é mais politicamente aceita. No Brasil, essa prática não é adotada, pois o descarte do fosfogesso em oceanos e rios apresenta riscos ambientais e à saúde, como contaminação da vida marinha e da água, que afeta a cadeia alimentar e representa perigo para a saúde pública devido ao acúmulo de metais pesados e elementos radioativos. Essa prática também prejudica ecossistemas costeiros, pode transportar poluentes para regiões distantes e causa um impacto duradouro devido ao longo tempo de degradação dos contaminantes (TCHERNICHÉ *et al.*, 2021).

2.6. REGULAMENTAÇÃO SOBRE A PRODUÇÃO E DISPOSIÇÃO

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), instituída pela Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, no uso das suas atribuições conferidas pela Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974, modificada pela Lei nº 7.781, de 17 de junho de 1989, e pelo Decreto nº 5.667, publicado no Diário Oficial da União em 11 de janeiro de 2006, conforme decisão da sua Comissão Deliberativa na 622^a Sessão realizada em 12 de agosto de 2015, considera:

- I. O processo de produção de ácido fosfórico a partir da rocha fosfática formagrandes quantidades de um subproduto conhecido como fosfogesso;
- II. O uso de fosfogesso na construção civil pode reduzir os custos de materiais de construção, como placas e tijolos;
- III. A remoção de pilhas de fosfogesso armazenadas nas indústrias produtoras de ácido fosfórico diminui os impactos radiológicos ao meio ambiente causados pela dispersão desse material ao longo do tempo;
- IV. A mistura de fosfogesso com gipsita em proporções especificadas nesta Resolução, de acordo com as concentrações dos radionuclídeos Ra²²⁶ e Ra²²⁸ presentes, assegura que

não haverá um aumento significativo das doses de radiação para a população, conforme concluído pelo Grupo de Trabalho (GT) instituído pela Portaria DRS nº 001, de 03 de janeiro de 2013, conforme Processo nº 01341.002109/2013-06.

Considerando os benefícios econômicos do uso de fosfogesso na construção civil, como a redução dos custos de materiais, e os benefícios ambientais, como a diminuição dos riscos radiológicos decorrentes do armazenamento prolongado de fosfogesso, a CNEN decidiu autorizar sua utilização. No entanto, essa autorização está condicionada ao cumprimento de limites específicos para as concentrações dos radionuclídeos Ra²²⁶ e Ra²²⁸ no fosfogesso, para garantir que não haja um aumento significativo da radiação para a população. A decisão se baseia em estudos e recomendações de um grupo de trabalho especializado e oficializado através dos seguintes artigos.

“Art. 1º Autorizar a utilização de fosfogesso na construção civil, desde que respeitadas as percentagens, em massa, de fosfogesso na mistura com gesso comum (gipsita não radioativa), em função das concentrações máximas de 226Ra e 228Ra presentes no fosfogesso.”

Este artigo permite a utilização de fosfogesso como material de construção, sob a condição de que a quantidade de fosfogesso misturada com gipsita não radioativa, desde que siga as porcentagens específicas estabelecidas mostrada na Tabela 10.

Tabela 10 - Porcentagens em massa de fosfogesso na mistura com gipsita.

Concentração Máxima de ^{226}Ra no Fosfogesso (Bq/ kg)	Concentração Máxima de ^{228}Ra no Fosfogesso (Bq/kg)				
	≤ 400	≤ 300	≤ 200	≤ 100	≤ 50
Percentual Máximo de Fosfogesso Permissível na Mistura					
≤ 50	50%	65%	85%	100%	100%
≤ 100	45%	50%	60%	85%	100%
≤ 150	35%	40%	50%	65%	75%
≤ 200	30%	35%	40%	50%	55%
≤ 300	25%	30%	30%	35%	40%
≤ 400	20%	25%	25%	25%	30%
≤ 600	15%	15%	15%	20%	20%
≤ 800	15%	15%	15%	15%	15%
≤ 1000	10%	10%	10%	10%	10%

Fonte: Adaptada do Diário Oficial da União.

Esta tabela apresenta as concentrações máximas permitidas de Ra^{226} e Ra^{228} no fosfogesso e o percentual máximo permissível de fosfogesso na mistura com gesso. A primeira coluna vertical e a primeira linha horizontal representam diferentes níveis de concentração de Ra^{226} e Ra^{228} , respectivamente. Os valores em percentuais indicam a porcentagem máxima de fosfogesso que pode ser misturada com gesso comum, garantindo que os níveis de radiação estejam dentro dos limites seguros estabelecidos pelas regulamentações.

“Art. 2º A diluição de fosfogesso em gesso comum (gipsita não radioativa) deve ser realizada dentro de instalação mínero-industrial sob controle regulatório da CNEN, levando em conta os valores de concentrações de atividade de ^{226}Ra e ^{228}Ra , determinados em laboratórios reconhecidos pela CNEN e os respectivos fatores de diluição especificadas no artigo 1º.”

Este artigo estipula que a mistura de fosfogesso com gesso comum deve ocorrer em instalações mínero-industriais específicas, que estão sob a supervisão da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). A supervisão regulatória da CNEN garante que o processo siga as normas de segurança e qualidade. As concentrações de atividade dos radionuclídeos Ra^{226} e Ra^{228}

devem ser medidas por laboratórios reconhecidos pela CNEN, assegurando que os níveis de radioatividade estejam dentro dos limites seguros estabelecidos anteriormente.

Ainda, outro guia regulatório de procedimento para verificação e análise do fosfogesso para seu uso na agricultura e na indústria cimenteira, estabelece os níveis de isenção para o uso do fosfogesso na agricultura e na indústria cimenteira. Níveis de isenção referem-se às concentrações de radionuclídeos abaixo das quais o material pode ser utilizado sem restrições adicionais, pois são consideradas seguras para a saúde humana e o meio ambiente. A Resolução CNEN nº 147/2013 foi publicada no Diário Oficial da União em 25 de março de 2013:

"Art 1º Estabelecer como nível de isenção de controle regulatório para o uso do fosfogesso na agricultura ou na indústria cimenteira o valor médio de 1.000 Bq/kg para concentração de atividade de Ra²²⁶ ou de Ra²²⁸, para cada radionuclídeo."

O nível adotado no guia regulatório baseia-se no IAEA Safety Standard Series - RS-G-1.7: *"Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance"*, publicado pela Agência Internacional de Energia Atômica. Os níveis de isenção definidos na Norma CNEN-NN-3.01 *"Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica"* (Resolução CNEN 114/11) e detalhados na Posição Regulatória 3.01-001 não são aplicáveis à utilização do fosfogesso. Isso ocorre porque esses níveis foram estabelecidos com base em cenários que restringiam a quantidade total de material a 1 tonelada.

Segundo a norma, cada operador ou proprietário que distribuir ou vender fosfogesso deve preparar documentação descritiva que acompanhe o produto. Essa documentação deve ser formalmente encaminhada à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), com data e assinatura do responsável legal pela instalação.

Sobre a remoção de pilhas para distribuição ou venda de fosfogesso é permitida sob as seguintes condições: O operador ou proprietário da pilha deve determinar as concentrações de atividade de Ra²²⁶ e Ra²²⁸ pelo menos uma vez ao ano na parte da pilha de onde será retirado o fosfogesso para distribuição ou venda. A concentração média de Ra²²⁶ e Ra²²⁸ na área da pilha a ser removida não pode exceder 1 Bq/g para cada um desses radionuclídeos (CNEN PR-488/01).

O Brasil é um dos países com maior tolerância a níveis de radioatividade em resíduos como o fosfogesso (até 1000 Bq/kg). Nos Estados Unidos o limite é um dos mais restritivos, limitando o uso de fosfogesso devido a preocupações com a exposição ao ²²⁶Ra. A União

Europeia adota uma abordagem equilibrada, permitindo usos condicionados à conformidade com as recomendações de segurança (BOUARGANE, 2023). Na China é incentivado o aproveitamento de resíduos industriais na construção civil para tecnologias de economia circular, com limites semelhantes aos do Brasil. Na África do Sul e na Austrália as regulamentações são inspiradas em padrões internacionais, com foco em segurança ambiental e análise de caso (BOUARGANE, 2023). A Tabela 11 ilustra as diferenças nos limites de Radioatividade para Uso de Fosfogesso e abordagens regulatórias do uso do fosfogesso em diferentes países.

Tabela 11 - Regulamentação de resíduos radioativos em diferentes países.

País	Limite de Radioatividade para Uso de Fosfogesso	Aplicações Permitidas	Órgão Regulador/Norma
Brasil	1000 Bq/kg (226Ra e 228Ra)	Agricultura e indústria da construção (cimento e gesso)	CNEN - Norma CNEN NN 4.01
Estados Unidos	370 Bq/kg (226Ra)	Restrições rigorosas, uso em casos específicos aprovados	EPA - Subparte R de 40 CFR Parte 61
União Europeia	1000 Bq/kg (Recomendações específicas para produtos)	Construção, desde que atenda aos critérios de segurança	Diretiva 2013/59/Euratom
China	1000 Bq/kg (226Ra, 232Th e 40K combinados)	Produção de materiais de construção (cimento e placas)	GB/T 23456-2009 - Especificação Técnica Normativa
África do Sul	1000 Bq/kg (Conformidade com normas internacionais)	Uso na construção civil, após testes de conformidade	Normas Nacionais Sul-Africanas (SANS)
Austrália	Avaliação caso a caso, sem limite universal	Uso condicionado a análises e monitoramento contínuo	Autoridade de Proteção Ambiental (EPA)

Fonte: Elaborada pela autora (BOUARGANE, 2023).

Para que o fosfogesso seja utilizado na indústria da construção, é necessária uma certificação que ateste sua conformidade com padrões de qualidade, segurança e sustentabilidade. Essa certificação envolve a realização de análises químicas e radiológicas, além de testes de desempenho físico e mecânico do material. Normas internacionais, como a ISO 14001, também podem ser aplicáveis no contexto da gestão ambiental e do uso sustentável de resíduos industriais (BOUARGANE, 2023).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para a execução deste trabalho envolveu a coleta de informações relevantes aos objetivos estabelecidos, através de plataformas científicas, consultas em órgãos reguladores e revisão da legislação em vigor. Além disso, foi realizada coleta de dados relativa ao uso industrial do fosfogesso na produção de cimento. As informações foram fornecidas pela CSN cimentos (Companhia Siderúrgica Nacional). A análise detalhada das informações obtidas por meio da revisão bibliográfica e da coleta de informações junto à CSN foram essenciais para compreender a evolução das tecnologias de produção na indústria cimenteira e a aplicação do fosfogesso nesse segmento. Assim, nos seguintes itens será explicado detalhadamente o compilado de todas as informações.

3.1. NATUREZA DO TRABALHO

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa exploratória-descritiva, utilizando procedimentos técnicos de revisão documental e análise bibliográfica. Foram coletadas informações de artigos científicos, dissertações, teses, livros, revistas, relatórios técnicos, manuais e portarias disponíveis ao público. As fontes selecionadas foram analisadas e exploradas ao longo do trabalho, levando em consideração sua relevância para o tema e a data de publicação dos documentos.

A pesquisa bibliográfica que fundamenta a argumentação deste estudo foi realizada em bases de dados científicas, como Scopus, Science Direct, Periódicos CAPES e SciELO. Foram consideradas fontes em português e inglês que abordam temas pertinentes ao tema fosfogesso. Para a busca, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: “*phosphogypsum*”, “*phosphate fertilizers*”, “*application of phosphogypsum*”, “*phosphoric acid*” e “*gypsum by-products*”. Além disso, a pesquisa foi realizada utilizando o operador booleano (AND), para combinar várias palavras-chave para refinar os resultados e assegurar que todas as condições especificadas possam ser atendidas, as palavras utilizadas foram: “*application*”, “*cement industry*”, “*gypsum by-products*”, “*chemical plaster*”, “*plaster waste*”, “*agricultural plaster*” e “*synthetic plaster*”.

Ainda, utilizou-se a busca avançada que permitiu a aplicação de filtros adicionais. Foram utilizados artigos publicados entre 2014 e 2024 para assegurar a obtenção de dados abrangentes e baseados em conhecimentos sólidos sobre a indústria, além de documentos atualizados que permitissem analisar as mudanças e evoluções na cadeia de produção. No caso dos livros consultados, não houve restrição de período, visando obter informações consolidadas sobre as

tecnologias de produção. A seleção do material para a elaboração deste trabalho foi orientada pela relevância ao tema e pelas publicações que apresentavam maior sinergia com o assunto tratado.

3.2. ESTUDO DE CASO

Durante o levantamento bibliográfico sobre o cenário do emprego do fosfogesso no Brasil e no mundo, foram observadas aplicações em diversos setores distintos, incluindo na construção civil e produção de cimento Portland. Por esta razão, buscou-se tentar compreender do ponto de vista industrial, como e quais seriam os impactos da reutilização do fosfogesso na indústria cimenteira. Para tal, foi realizado um levantamento de empresas que haviam desenvolvido pesquisas ou o emprego direto na produção de cimento, chegando a CSN Cimentos. Dessa forma, foi estabelecido o contato com o coordenador responsável da planta de Arcos (MG), a principal fábrica integrada da CSN Cimentos.

Para a compressão da extensão do impacto da aplicação do fosfogesso no processo produtivo da fábrica, foram realizados questionamentos de caráter investigativos ao coordenador buscando explorar aspectos técnicos, econômicos, ambientais e legais relacionados ao uso do fosfogesso na produção de cimento. Especificamente quanto as seguintes temáticas:

1. Identificar os desafios técnicos: problemas, necessidade de pré-tratamento, impacto nas propriedades do cimento;
2. Avaliar as vantagens econômicas: custo, disponibilidade e possibilidades de uso em comparação a gipsita;
3. Compreender os impactos ambientais: benefícios em relação ao descarte, questões específicas e requisitos legais;
4. Investigar uma estratégia técnica e econômica de beneficiamento: remoção de contaminantes, aproveitamento sustentável;
5. Analisar a percepção e adoção pela indústria: tendências e perspectivas futuras.

Essas questões visavam fornecer uma visão ampla e fundamentada sobre a integração do fosfogesso como matéria-prima na indústria cimenteira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. USO DE FOSFOGESSO NO CIMENTO PORTLAND

O uso de fosfogesso no cimento Portland tem se destacado como uma alternativa viável e sustentável para a substituição da gipsita, como regulador do tempo de pega. Além de reduzir o impacto ambiental associado à disposição de fosfogesso, este subproduto industrial pode contribuir para a melhoria de propriedades mecânicas e a durabilidade dos cimentos. Este subitem apresenta uma síntese dos resultados de estudos recentes que investigaram o desempenho do cimento Portland contendo fosfogesso, com ênfase em suas propriedades mecânicas, hidratação e sustentabilidade ambiental.

Para ser usado na construção civil, o fosfogesso necessita de tratamento, já que contém impurezas como P_2O_5 , fluoretos e matéria orgânica, o que pode tornar seu uso economicamente inviável em alguns casos. Essas impurezas variam de acordo com a origem da rocha, gerando preocupações ambientais, como a contaminação do ar com fluoretos ou a poluição de lençóis freáticos. Na produção de cimento, o fosfogesso deve ser adicionado em até 5% da massa total, conforme as regulamentações brasileiras, resolução CNEN nº 179/2014, emitida pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)(LIMA, 2019).

4.1.1 Propriedades do Fosfogesso para Uso em Cimento

A inclusão de fosfogesso no cimento Portland pode impactar diversas propriedades do material. Estudos demonstram que o fosfogesso pode melhorar a resistência à compressão do cimento, especialmente nos estágios iniciais de cura, devido à sua influência nos processos de hidratação. Além disso, contribui para a durabilidade, reduzindo a porosidade e aumentando a densidade do material, fatores cruciais para a resistência a ataques químicos e variações climáticas. A retenção de água é outra propriedade favorecida, promovendo uma hidratação mais uniforme, enquanto o tempo de pega é ajustado de acordo com a proporção de fosfogesso utilizada, permitindo maior flexibilidade no uso prático do material (LUTKE, 2023). Algumas propriedades influenciadas pelo uso do fosfogesso foram apontadas por Lima (2019) e são descritas a seguir.

I. Superfície Específica e Reatividade

A reatividade do fosfogesso e da gipsita está diretamente relacionada à formação da etringita. Esse processo é influenciado pela dissolução do $CaSO_4$ em água, pois a liberação dos

íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} é essencial para a reação com aluminatos presentes no meio. A solubilidade do sulfato de cálcio, por sua vez, depende da estrutura cristalina e da pureza do material, sendo que as impurezas no fosfogesso podem alterar sua taxa de dissolução e, consequentemente, sua reatividade na formação da etringita.

O ensaio de Blaine é um teste utilizado para medir a superfície específica de materiais em pó. Essa superfície específica é expressa em m^2/g e representa a área total das partículas por unidade de massa do material, e baseia-se no princípio da permeabilidade ao ar: quanto maior a superfície específica de um material, menor será o espaço entre as partículas, dificultando a passagem do ar. Os ensaios de Blaine indicam que a superfície específica do fosfogesso ($2,675 \text{ m}^2/\text{g}$) e da gipsita ($2,638 \text{ m}^2/\text{g}$) são equivalentes, com diferença de apenas 1,38%, o que implica tempos de hidratação semelhantes.

II. Fluorescência de Raios-X (FRX)

A espectrometria por fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica analítica que permite a determinação da composição química de materiais em geral. Logo, pode ser usada na determinação da composição do fosfogesso e do cimento. A presença de impurezas no fosfogesso, como o alto teor de P_2O_5 , pode aumentar o tempo de pega da matriz de cimento. Essas impurezas são resíduos da reação do ácido sulfúrico com a rocha fosfática na produção de ácido sulfúrico e variam conforme o tipo de rocha (LIMA, 2019).

O teor de P_2O_5 no sulfato de cálcio (gesso e fosfogesso) não deve ultrapassar 0,8% para ser usado como adição ao clínquer, pois é capaz de interferir na hidratação do cimento, afetando a formação de compostos essenciais, como a etringita e os silicatos de cálcio hidratados, que são responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica do material. Isso pode resultar em um tempo de pega inadequado, levando tanto a um endurecimento muito rápido quanto a um retardamento excessivo, comprometendo o desempenho estrutural do concreto (SOUSA *et al.*, 2022).

Além disso, altos teores de P_2O_5 podem reduzir a adesão entre a massa de cimento e os agregados, impactando qualidades de durabilidade e resistência mecânica da estrutura. Outro problema é a possível instabilidade dimensional do cimento hidratado, aumentando a suscetibilidade a fissuras e retração durante a cura (SOUSA *et al.*, 2022).

III. Densidade e Tempo de Pega

Os valores de densidade do CPI-Gesso ($2,91 \text{ g/cm}^3$) e CPI-Fosfogesso ($2,94 \text{ g/cm}^3$) estão próximos, evidenciando consistência na composição das matrizes. O teste de tempo de pega pode ser observado na Tabela 12 (LIMA, 2019).

Tabela 12 - Tempo de pega CPI Gesso x Fosfogesso

Tempo	CPI-Gesso	CPI-Fosfogesso
Início de Pega	2h45	2h40
Fim de Pega	3h40	3h15
Tempo de Pega	55min	35min

Fonte: Adaptado de LIMA (2019).

O CPI-fosfogesso apresenta o menor tempo de pega, de 35 minutos, devido à sua maior reatividade com a água, resultante da finura. A dissolução rápida do sulfato de cálcio leva à formação acelerada de etringita, iniciando o processo de pega da matriz. Assim, os resultados do ensaio confirmam as expectativas, correlacionando-se positivamente com os dados obtidos.

Lima (2019) verificou que o fosfogesso estudado era viável como substituto do gesso para controlar o tempo de pega do cimento Portland, atendendo às normas de utilização e fabricação. Contudo, seria necessário definir uma proporção ideal entre clínquer e fosfogesso para garantir um tempo de pega adequado. Estudos realizados recentemente mostram resultados de substituição parcial ou total da gipsita por fosfogesso no cimento Portland, indicando vantagens significativas. Os resultados apresentados na Tabela 13, fazem uma comparação entre os resultados de resistências inicial e final, e de tempos de pega entre cimentos preparados com uso de fosfogesso e gipsita.

Os resultados indicam que o fosfogesso é capaz de manter ou até melhorar os valores de resistência inicial e final, dependendo das condições de produção e dos teores de substituição. Além disso, o material influenciou positivamente propriedades como retenção de água e durabilidade, tornando o cimento mais resistente a condições ambientais adversas.

Tabela 13 - Propriedades Mecânicas do Cimento com Fosfogesso.

Estudo	Autoria	Substituição da Gipsita (%)	Resistência Inicial (MPa)	Resistência Final (MPa)	Tempo de Pega Inicial (min)	Tempo de Pega Final (min)
Estudo A	(FARIAS <i>et al.</i> , 2023)	0%	20,0	45,5	110	240
Estudo B	(GRACIOLI <i>et al.</i> , 2017)	25%	21	46,5	115	235
Estudo C	(PINTO, 2020)	50%	22,5	48	120	250
Estudo D	(LIMA, 2019)	75%	23	47	130	260
Estudo E	(COSTA <i>et al.</i> , 2024)	100%	20	45,5	110	240

Fonte: Elaborada pela autora

A resistência inicial e final do cimento é mantida ou melhorada, de acordo com os dados dos estudos explorados na Tabela X, com valores variando entre 20 MPa e 23 MPa para resistência inicial e entre 45,5 MPa e 48 MPa para resistência final. O tempo de pega inicial, essencial para a trabalhabilidade, está dentro da faixa aceitável (110 a 130 minutos), enquanto o tempo de pega final, que define o período em que o cimento atinge rigidez total, varia de 235 a 260 minutos. Esses resultados indicam que o fosfogesso não compromete a performance mecânica do cimento, garantindo viabilidade técnica para aplicação em construções civis.

4.2. ESTUDO DE CASO

A CSN Cimentos é uma das maiores produtoras de cimento do Brasil, concorrente como parte do Grupo CSN, que é amplamente reconhecida por suas atividades nos setores de siderurgia, mineração, logística, energia e cimento. A CSN Cimentos consolidou sua posição no mercado com a aquisição da LafargeHolcim em 2021, aprovada em 2022, adicionando 10,3 milhões de toneladas anuais à sua capacidade produtiva. Isso ampliou sua presença geográfica e diversificou seu portfólio, tornando-a uma das líderes do setor no Brasil. A empresa opera com plantas de grande relevância, como a fábrica de Arcos (MG), responsável pela produção de clínquer, e a de Volta Redonda (RJ), que utiliza escória de alto-forno como matéria-prima. Com a integração da LafargeHolcim, a CSN Cimentos passou a contar com mais reservas de calcário e plantas adicionais, aumentando sua competitividade e eficiência operacional. Essa aquisição fortaleceu a capacidade de atender às demandas regionais e proporcionou sinergias logísticas e comerciais relevantes.

A CSN Cimentos fabrica diferentes tipos de cimento Portland, como CP II (E e F) e CP III. O CP III, produzido com alta adição de escória de alto-forno, é especialmente conhecido por sua durabilidade e menor impacto ambiental, enquanto o CP II apresenta resistência inicial superior ao CP III.

A principal matéria-prima da produção de cimento da CSN Cimentos inclui calcário, argila e escória granulada de alto-forno, ambos extraídos ou gerados em suas operações integradas. A escória de alto-forno é proveniente das operações siderúrgicas da CSN. A principal matéria-prima do cimento é o calcário, composta principalmente de carbonato de cálcio (CaCO_3). O calcário utilizado pela CSN Cimentos é extraído principalmente das jazidas próximas às suas fábricas, como em Arcos (MG), que possui uma das maiores reservas de calcário do país. A escória de alto-forno é subproduto da siderurgia, a CSN Cimentos aproveita a escória gerada em sua usina de Volta Redonda (RJ), reduzindo a dependência de matérias primas naturais.

A utilização do fosfogesso na produção de cimento pela CSN, se concentrou na unidade de Arcos, em Minas Gerais. A fábrica empregou o fosfogesso em substituição à gipsita ao longo de dois anos, tempo que permitiu à empresa compreender o comportamento do cimento mediante essa substituição.

A principal motivação para essa mudança concentra-se na redução dos custos associados à obtenção da matéria-prima natural. Custos estes, especialmente relacionados ao transporte da gipsita até o Sudeste do Brasil. Essa abordagem foi impulsionada pela necessidade de otimizar as operações logísticas e econômicas da empresa, considerando o aumento das despesas com frete e o impacto direto da distância sobre o preço final do produto. A busca por fornecedores localizados em regiões mais próximas, ou a adoção de alternativas que viabilizassem uma cadeia de suprimentos mais eficiente, visou não apenas reduzir os custos operacionais, mas também melhorar a competitividade no mercado.

I. Características do Emprego de fosfogesso

A CSN utilizou o fosfogesso tanto de forma total quanto parcial, substituindo a gipsita nas formulações de cimento CPII F32. A adição de fosfogesso foi limitada a 5% da massa do cimento, conforme regulamentado pela ABNT NBR 16697, essa norma estabelece as especificações de materiais adicionados ao clínquer na fabricação de cimento, garantindo propriedades adequadas ao produto. Para mitigar os impactos da acidez, a empresa implementou um sistema de neutralização utilizando Ca(OH)_2 . A neutralização do fosfogesso foi um processo

necessário para garantir que as impurezas, como P_2O_5 e fluoretos, não prejudicasse a qualidade do cimento que foi avaliada por propriedades como:

1. Resistência mecânica: A capacidade do cimento de suportar cargas.
2. Tempo de pega: A duração para o cimento passar do estado plástico para sólido, que afeta a trabalhabilidade da pasta de cimento.
3. Durabilidade: A resistência a fatores ambientais externos, como ataque de sulfatos e cloretos.
4. Estabilidade volumétrica: A estabilidade volumétrica do cimento Portland, também conhecida como expansibilidade, é um fenômeno de expansão volumétrica que ocorre no estado endurecido do cimento. Essas características podem ser afetadas pela presença de impurezas no fosfogesso, como P_2O_5 e fluoretos que podem prejudicar a durabilidade e desempenho mecânico de argamassas e concretos.

As características físicas e químicas do fosfogesso podem ser observadas na Tabela 14 e exigiram adaptações na operação industrial da empresa.

Tabela 14 - Características físicas e químicas do fosfogesso.

Características Físicas e Químicas	Descrição
Coloração	Amarelada
Granulometria	Inferior a 10 mm
Alto teor de umidade	Dificuldade de transporte e dosagem
Altos níveis de P_2O_5	Aumentam a acidez e interferem na hidratação do cimento
Presença de fluoretos	Contribuem para a acidez elevada

Fonte: Elaborada pela autora.

As características físicas e químicas do fosfogesso exigiram adaptações na operação industrial da empresa. A alta umidade do material dificulta o transporte e a dosagem, exigindo controle rigoroso no recebimento e armazenamento para evitar problemas de aglomeração. A coloração amarelada não impactou diretamente a funcionalidade, mas é forte indício da presença de impurezas. A granulometria inferior a 10 mm exigiu ajustes para garantir uma mistura homogênea durante o processamento.

Quimicamente, os altos níveis de P_2O_5 e fluoretos são os responsáveis pela elevada acidez do material, fazendo necessária a etapa de neutralização com $Ca(OH)_2$, buscando evitar impactos negativos na qualidade final do cimento, como durabilidade e resistência mecânica. Além disso, a adoção de práticas rigorosas de armazenamento e a implementação de etapas de tratamento químico adicionais se fizeram necessárias, visando a adequação do fosfogesso às especificações industriais.

II. Desempenho do Cimento

Durante a utilização do fosfogesso na produção de cimento, a avaliação de desempenho de tempo de pega do cimento foi satisfatório, especialmente em relação ao controle do conteúdo de SO_3 , que é crucial para o tempo de pega do cimento. O SO_3 é um componente essencial na fabricação de cimento porque regula o tempo de pega, ou seja, o intervalo de tempo necessário para que o cimento passe do estado plástico para o estado sólido.

Este controle é importante para evitar o endurecimento rápido ou lento demais, o que poderia comprometer a trabalhabilidade e a resistência final do material. A capacidade do fosfogesso de fornecer SO_3 para o cimento foi eficiente e, consequentemente, ajudou a controlar o tempo de pega do cimento durante a fabricação.

III. Vantagens Econômicas

Inicialmente, o uso de fosfogesso foi economicamente interessante devido ao seu baixo custo em comparação à gipsita. No entanto, à medida que a empresa precisou investir em processos adicionais de neutralização da acidez do fosfogesso, como o uso de $Ca(OH)_2$, o custo de produção aumentou.

O uso do fosfogesso em misturas de cimento apresentou desafios em relação ao custo por unidade de SO_3 e ao controle do tempo de pega durante a fabricação. Esse custo adicional e a complexidade no processo de produção em comparação com o uso de gipsita, que não inclui esses tratamentos, se torna menos vantajoso financeiramente.

IV. Limitações

Um dos principais problemas encontrados pela CSN foi o elevado teor de umidade no fosfogesso, que causava dificuldades no processo de dosagem e exigia que o material fosse recebido apenas em períodos de estiagem para evitar complicações operacionais. Além disso, a

alta acidez do material resultava no aumento do tempo de pega do cimento, causado principalmente pela presença de impurezas como P_2O_5 e fluoretos que interfere no processo de hidratação do cimento.

A acidez excessiva pode retardar a reação química entre o cimento e a água, que é responsável pela formação de compostos que dão resistência mecânica. Isso ocorre porque os íons liberados pelas impurezas podem inibir a formação de cristais de etringita e outros compostos essenciais, prolongando o tempo necessário para o cimento resistir.

Esses fatores, em conjunto, levaram a cimenteira a optar pelo gesso, mesmo que inicialmente o fosfogesso fosse uma alternativa economicamente atraente. No entanto, a CSN defende que, em cenários de escassez ou preço elevado de gipsita, o fosfogesso pode ser uma opção viável, especialmente se os custos de tratamento puderem ser controlados.

4.3. ESTUDOS DE CASO E APLICAÇÕES PRÁTICAS

Corroborando as informações cedidas pela CSN Cimentos, estudos do uso de fosfogesso e soluções desenvolvidas para viabilizar seu reaproveitamento são apresentados a seguir, sendo discutidas destacando os benefícios técnicos, econômicos e ambientais, relativos ao tratamento de impurezas, a adaptação aos processos industriais e as exigências normativas.

4.3.1. Estudo A

O estudo A, realizado por Costa (2020), investigou o uso do fosfogesso como regulador do tempo de pega em cimentos Portland, em substituição total à gipsita. A pesquisa analisou duas amostras de fosfogesso FOS A - São Paulo (SP) e FOS B - Mato Grosso do Sul (MS) e gipsita (GIP), avaliando características físico-químicas, reações de hidratação, propriedades no estado fresco e os efeitos de impurezas. Ambas as amostras de fosfogesso passaram pelo mesmo processo de tratamento: secagem e moagem.

I. Composição físico-química das fontes de sulfato de cálcio

Os resultados da pesquisa indicam que as fontes de sulfato de cálcio apresentam diferenças significativas em sua composição físico-química, influenciadas pelo processo de produção e características das rochas fosfáticas e podem ser observadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros do FOS A, FOS B e GIP do ESTUDO A.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	FOS A	FOS B	GIP
pH	Básico	Ácido	Básico
Teor de P₂O₅ (%)	1%	1,08%	1%
Fosfato Solúvel	Não detectado	Presente	Não detectado
Flúor Solúvel (%)	0,2 - 0,1	0,2 - 0,1	0,2 - 0,1

Fonte: Adaptado de Costa (2022).

Apesar das diferenças de pH, as fontes de sulfato de cálcio apresentam teores similares de P₂O₅ total (próximos de 1%), com o FOS B sendo 8% mais elevado. O P₂O₅ presente no FOS A pode estar em forma insolúvel e básica, o que sugere que a qualidade do fosfogesso deve ser controlada não apenas por P₂O₅ total, mas também por P₂O₅ solúvel e flúor solúvel. A gipsita tinha menor teor de dihidratado, enquanto o FOS A tinha o maior teor de dihidratado e menor teor de anidrita. Esses compostos influenciam a solubilidade dos materiais.

As partículas de sulfato de cálcio, como gipsita e fosfogesso, têm formas irregulares e distribuições granulométricas influenciadas pela moagem. A técnica de granulometria a laser apresentou dificuldades em determinar o D(0,9) (diâmetro em que 90% das partículas são menores). Em contrapartida, o método BET, que mede a superfície específica, mostrou que a gipsita tem 6% mais superfície que o FOS A e 1,79% menos que o FOS B, o que influencia a sua reatividade.

II. Reações de hidratação

Os cimentos com FOS B apresentaram curvas de fluxo de calor com períodos de indução mais longos e valores de calor acumulado mais baixos. Em contraste, os cimentos com FOS A mostraram comportamento semelhante aos que usaram gipsita, sugerindo que os fosfatos solúveis têm maior influência no retardo das reações de hidratação, mesmo com teores totais de P₂O₅ próximos a 1% nos fosfogessos. Além disso, o pH da fonte de sulfato de cálcio também parece ser um fator importante, pois as reações de hidratação ocorrem em ambiente alcalino.

A análise por Difração de Raios X (DRX) e Derivada Termogravimétrica (DTG) não mostrou diferenças significativas entre os produtos de hidratação dos cimentos com FOS A e GIP. Os principais produtos formados foram etringita e portlandita. Os ensaios de resistência à compressão sugerem que o FOS A pode substituir a GIP em cimentos Portland com teores de

SO₃ total entre 4,0 e 4,5%. O fosfogesso (especialmente FOS A) têm potencial para substituir a gipsita em cimentos Portland, desde que os teores de SO₃ sejam controlados e os impactos de expansibilidade sejam avaliados. A influência dos fosfatos solúveis e o pH das fontes de sulfato de cálcio são fatores importantes para o controle da hidratação do cimento.

III. Conclusão

Os resultados indicaram que o FOS A apresentou comportamento semelhante ao da gipsita, com bom desempenho como regulador de pega, enquanto o FOS B, devido à presença de fosfatos solúveis e pH ácido, prolongou o processo de hidratação. Apesar disso, a composição físico-química, especialmente os níveis de SO₃ total e impurezas solúveis, é determinante para a previsão do uso do fosfogesso.

4.3.2. Estudo B

O estudo B, realizado por Rosales *et al.* (2020), avaliou amostras de fosfogesso submetidas a diferentes tratamentos, condições de cura e teores de incorporação. O objetivo foi analisar as previsões do fosfogesso como regulador de pega ou material cimentício suplementar, para melhorar o desempenho mecânico de argamassas de cimento.

Foram investigadas as propriedades físico-químicas, o comportamento mecânico e o impacto ambiental de argamassas de cimento e comparadas a amostra controle de gipsita que foi adicionado ao clínquer no processo final de moagem do cimento, como um retardador de pega. Na tabela 16 estão organizados os quatro tipos de tratamentos no fosfogesso que foram utilizados no estudo.

Tabela 16 - Processos de tratamento do fosfogesso utilizados no estudo.

SIGLA	TIPO DE FOSFOGESSO	PROCESSO DE TRATAMENTO
PG-D	Fosfogesso seco	Seco em estufa a 40 °C por 48 h.
PG-C	Fosfogesso triturado	Triturado em moinho e peneirado em malha de 125 µm.
PG-B	Fosfogesso queimado	Calcinado em mufla a 800 °C por 18 h.
PG-W	fosfogesso lavado	Lavado duas vezes com água destilada (relação líquido/sólido 10:1) e seco em estufa a 40 °C por 48 h.

Fonte: Adaptado de Rosales *et al.*, (2020).

As amostras de fosfogesso foram incorporadas ao clínquer em proporções de 2,5% e 5% para avaliação das propriedades tecnológicas e ambientais das argamassas de cimento.

I. Consistência, Densidade e Tempo de Pega

A consistência e a densidade das argamassas de cimento foram avaliadas antes do tempo de pega. À medida que as taxas de fosfogesso aumentavam a consistência, tornava a massa mais rígida e exigia mais água para atingir valores semelhantes à argamassa de controle (gesso). Com 5% de fosfogesso, os valores ficaram próximos ao controle. A Tabela 17.1 e Tabela 17.2 indicam que o tratamento do fosfogesso não afetou significativamente a consistência.

Tabela 17.1 - Propriedades físicas das argamassas frescas com 2.5% de incorporação.

AMOSTRA (2.5%)	Consistência (mm)	Densidade (g/cm ³)	Tempo (minutos)	
			Inicial	Final
Gesso	157	2031	149	193
PG-D	153	1974	153	209
PG-C	156	1991	132	197
PG-B	154	1982	158	213
PG-W	159	1987	146	203

Fonte: Adaptado (ROSALES *et al.*, 2020).

Tabela 17.2 - Propriedades físicas das argamassas frescas com 5% de incorporação.

AMOSTRA (5%)	Consistência (mm)	Densidade (g/cm ³)	Tempo (minutos)	
			Inicial	Final
Gesso	135	2028	141	187
PG-D	146	1996	181	246
PG-C	149	2023	166	224
PG-B	148	2003	186	221
PG-W	153	2016	193	264

Fonte: Adaptado (ROSALES *et al.*, 2020).

Diferentemente da consistência, a densidade aumentou com maiores taxas de fosfogesso, sendo influenciada pelo tipo de tratamento. Argamassas com fosfogesso trituradas, queimadas

ou lavadas apresentam maior densidade devido à remoção de impurezas e ao preenchimento de poros abertos pelos produtos de hidratação.

Os tempos de pega inicial e final aumentaram com o uso de fosfogesso. Para até 2,5% de incorporação de fosfogesso, os tempos de pega foram menores que o de controle. Acima desta proporção, houve um aumento gradual. A presença de fósforo no fosfogesso prolonga os tempos de pega, enquanto o uso de gipsita, com menor teor de fósforo leva a um tempo de pega mais rápido. A amostra PG-C com 5% de incorporação apresentou os melhores resultados para tempos de pega, enquanto o PG-W, devido ao aumento de impurezas não solúveis, teve os maiores tempos.

II. Resistência à Compressão e Flexão

O estudo demonstrou que as condições de cura influenciam significativamente as propriedades técnicas das argamassas. As argamassas curadas em ambiente subaquático tiveram maiores valores de resistência à compressão (RC) em comparação com aquelas curadas em câmara seca, independentemente do tratamento ou da taxa de incorporação.

Todas as argamassas contendo fosfogesso mostraram valores de RC superiores às das fabricadas com gipsita. Para 2,5% de fosfogesso, os materiais processados tratados obtiveram maior RC em todas as condições de cura e idades, com destaque para PG-W, devido à limpeza de impurezas. A incorporação de fosfogesso também foi comprovada em maior RC em argamassas curadas subaquáticas, com destaque para as fabricadas com 5% de fosfogesso, que superaram o controle. O fosfogesso, além de regular o tempo de pega, contribuiu para o aumento da RC devido à sua composição química e reatividade.

Em relação à resistência à flexão (RF), esta também aumentou com a maior incorporação de fosfogesso, sendo mais significativa em argamassas curadas em câmara seca. Embora os valores de fosfogesso em cura subaquática não tenham superado claramente o controle, a adição de fosfogesso mostrou benefícios importantes em ambas as condições de cura. Após a análise do comportamento mecânico de cada argamassa de cimento, a Tabela 18 apresenta uma síntese dos parâmetros ideais de tratamento, proporção de incorporação e condições de cura.

Tabela 18 - Resumo dos parâmetros para o comportamento mecânico mais adequado.

PARÂMETROS IDEAIS	
Incorporação:	5%
Tratamento:	FG-D Fosfogesso seco
Condição de cura:	subaquática
Resistência à Compressão:	58,44 MPa
Resistência à Flexão:	14,3 MPa

Fonte: Adaptado (ROSALES *et al.*, 2020).

O tratamento ideal resultou em um desempenho superior com valores de RC de 13,9% maiores em relação ao controle e 9,3% superiores a RF.

III. Retração

As argamassas com 2,5% de fosfogesso obtiveram valores de retração muito próximos, independentemente do tratamento, e semelhantes às das argamassas fabricadas com cimento Portland. Já as argamassas produzidas com gipsita apresentaram maior instabilidade dimensional em comparação às fabricadas com fosfogesso, confirmado estudos anteriores que indicam que maiores taxas de incorporação de gipsita aumentam a retração, isso porque a maior incorporação de gipsita nas argamassas aumenta a quantidade de sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) presente na mistura, esse composto tem alta solubilidade em água, o que pode levar a um maior volume inicial durante a hidratação, seguido por uma perda gradual de umidade conforme o material seco. Esse processo resulta em uma maior retração, pois a redução do teor de água livre provoca a contração do material, aumentando o risco de fissuração e instabilidade dimensional da argamassa ao longo do tempo.

Todas as argamassas contendo fosfogesso tiveram menor retração em relação às fabricadas com gipsita, tanto com 2,5% de fosfogesso quanto 5%. No entanto, o incremento do teor de fosfogesso aumentou os valores de retração. Argamassas com 5% de fosfogesso tiveram retração significativamente maior em comparação às com 2,5% de fosfogesso.

O estudo concorda que o tamanho das partículas de fosfogesso influenciou diretamente as mudanças dimensionais. Argamassas feitas com FG-C (triturado) e FG-B (queimado), que possuem partículas menores, apresentaram maior retração em ambas as séries (2,5% e 5% de

fosfogesso) em comparação às produzidas com FG-D (seco) e FG-W (lavado). Esse comportamento pode estar relacionado à composição química do fosfogesso, que sofre pequenas alterações na função dos tratamentos, contribuindo para a maior retração observada nas argamassas com 5% de fosfogesso.

IV. Impacto Ambiental

Um dos objetivos deste estudo foi avaliar a mobilidade de impurezas em argamassas contendo 5% de fosfogesso. Foi realizada uma análise de lixiviação para comparar a liberação de metais pesados do fosfogesso na matriz cimentícia de acordo com a Decisão do Conselho 2003/33/CE Conselho (2003), os resíduos podem ser classificados como inertes, não perigosos ou perigosos. Entre os oligoelementos desenvolvidos, os maiores níveis encontrados foram de Ba, Cd, As e Pb. O fosfogesso demonstrou aumentar a capacidade de retenção de elementos tóxicos, como As, Cd e Pb. O teor de metais pesados apresentado no fosfogesso não ultrapassa os limites ambientais estabelecidos, sendo classificado como material não perigoso. O teor de Cd excede os limites para classificação como material inerte, conforme Decisão do Conselho 2003/33/EC. Os resultados foram comparados com argamassas fabricadas com gipsita. As argamassas contendo fosfogesso continham menores concentrações de metais pesados em geral, exceto para Cr e As, quando comparadas com o controle.

Nenhuma amostra excedeu os limites de lixiviação estabelecidos pelas normas. A análise da lixiviação do fosfogesso em matriz cimentícia indicou uma redução na liberação de metais pesados, em consonância com estudos prévios realizados de acordo com a norma EN 12457-2, que apontaram resultados semelhantes para diferentes tipos de resíduos.

Conclui-se que o fosfogesso é viável como substituto da gipsita na fabricação de argamassas de cimento, podendo ser utilizado sem tratamento prévio. O tratamento do fosfogesso influencia propriedades como tempo de pega e densidade. O teste de lixiviação confirmou o fosfogesso como um material ambientalmente seguro.

V. Conclusão

As condições de cura exercem um impacto significativo sobre a resistência das argamassas de cimento. Especificamente, a cura dos corpos de prova em água promoveu maior resistência mecânica em comparação com aqueles curados em câmara seca.

No que se refere às propriedades, a incorporação de maiores quantidades de fosfogesso (teor de 5%) comprovado em um aumento na formação de alita, o que, por sua vez, elevou tanto a resistência à compressão quanto a resistência à flexão sob condições de cura subaquática. As reações internas observadas na pasta de argamassa com 5% de fosfogesso incorporado ocorreram de maneira mais lenta quando curadas em meio aquático. Esse comportamento favorece maior pozolanicidade nas misturas, o que se reflete em melhorias no desempenho mecânico. Além disso, os resultados mecânicos foram semelhantes entre as argamassas fabricadas com fosfogesso tratadas e não tratadas, evidenciando que o uso de fosfogesso sem qualquer tipo de tratamento é tecnicamente viável para a produção de argamassas de cimento.

Do ponto de vista ambiental, o ensaio de lixiviação indicou que o fosfogesso é classificado como um material não perigoso. Além disso, sua incorporação em uma matriz cimentícia contribui para a redução da emissão de metais pesados. Argamassas de cimento produzidas com adição de fosfogesso contêm características que são classificadas como materiais inertes, reforçando sua segurança e supervisão ambiental.

4.3.3. Estudo C

No estudo C, de Costa *et al.* (2024), a investigação teve como objetivo avaliar a substituição da gipsita por fosfogesso, garantindo que as características do cimento não fossem comprometidas. Foram realizados diversos ensaios como, tempo de pega e expansibilidade, resistências à compressão e à flexão nos cimentos produzidos, permitindo avaliar os efeitos do fosfogesso em suas propriedades e determinar os melhores teores de substituição. Comparou-se as seguintes amostras:

1. Grupo de Controle (GP): Clínquer + Gipsita;
2. FG-1: Clínquer + Fosfogesso;
3. FG-2: Clínquer + Misturas de Gesso (25% Fosfogesso +75%GP);
4. FG-3: Clínquer + Misturas de Gesso (50% Fosfogesso +50%GP);

I. Tempo de Presa e Expansibilidade

Com base no Tabela 19 pode-se concluir que todos os cimentos produzidos estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas, quanto ao tempo de pega e expansibilidade, independentemente do teor de SO₃ utilizado. Os valores apresentados são resultado de uma média triplicata de amostra.

Tabela 19 - Tempo de Pega e Expansibilidade.

Amostra	SO ₃ (%)	Início de pega (min)	Fim de pega (min)	Expansibilidade (mm)
GP	1,76	166,67	200,00	0,25
FG-1	1,76	223,33	280,00	0,50
FG-2	1,76	175,00	221,67	0,33
FG-3	1,76	173,33	233,33	0,67

Fonte: Elaborada pela autora (COSTA *et al.*, 2024).

A utilização do cimento do FG-1 resultou em um aumento no tempo inicial de pega. Esse comportamento não é viável para o processo de fabricação de cimento da empresa, devido às implicações negativas no tempo de produção e na eficiência operacional. Isso ocorre devido ao teor de P₂O₅ estar próximo do limite superior descrito na literatura. O fósforo presente no P₂O₅ interfere no processo de hidratação do cimento, retardando as reações químicas responsáveis pela resistência inicial, o que explica os tempos de pega mais prolongados observados.

II. Resistências à Compressão e à Flexão

Foram apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e flexão aos 1, 7 e 28 dias, bem como as implicações relacionadas às variações dimensionais e de massa. Os valores apresentados na Tabela 20 e na Tabela 21 são resultado de uma média triplicada de amostra.

Tabela 20 - Resistência à compressão aos 1, 7 e 28 dias das amostras.

Amostra	1 Dia (MPa)	7 Dias (MPa)	28 Dias (MPa)	Espalhamento (mm)
GP	8,70	44,13	57,87	70,33
FG-1	7,83	44,93	56,27	68,33
FG-2	8,36	37,17	57,06	63,67
FG-3	7,60	40,13	53,20	68,00

Fonte: Elaborada pela autora (COSTA *et al.*, 2024).

Observa-se que, no primeiro dia, a resistência varia entre 7,60 MPa (FG-3) e 8,70 MPa (GP), com o cimento de controle (GP) apresentando o maior valor, o que indica um desenvolvimento inicial mais rápido da resistência. As demais amostras, FG-1, FG-2 e FG-3,

demonstraram resistências moderadamente inferiores, indicando um processo de hidratação mais lento nas primeiras horas. Os resultados do teste de espalhamento mostram que foi observada maior fluidez no GP, com 70,33 mm, indicando melhor trabalhabilidade da mistura. A amostra FG-2 teve o menor valor de espalhamento, com 63,67 mm, o que pode indicar uma mistura menos fluida. As amostras FG-1 e FG-3 obtiveram valores intermediários, com 68,33 mm e 68,00 mm, respectivamente.

Verifica-se que a amostra FG-2 é destacada por apresentar um comportamento mecânico muito próximo ao cimento de controle, principalmente aos 28 dias, o que torna uma alternativa viável para substituição do GP em aplicações que incluem resistência final semelhante. O FG-1, por sua vez, demonstrou uma resistência mais elevada aos 7 dias, podendo ser vantajoso para aplicações que exigem um ganho precoce de resistência. Já o FG-3 teve um desempenho inferior tanto na resistência aos 28 dias quanto na trabalhabilidade, o que pode limitar seu uso em determinadas aplicações.

Tabela 21 - Resistência à flexão aos 1, 7 e 28 dias das amostras.

Amostra	1 Dia (MPa)	7 Dias (MPa)	28 Dias (MPa)	Espalhamento (mm)
GP	2,13	7,23	8,80	70,33
FG-1	0,63	7,33	8,53	68,33
FG-2	1,93	7,17	8,20	69,67
FG-3	1,80	6,83	8,50	68,00

Fonte: Elaborada pela autora (COSTA *et al.*, 2024).

Embora os valores de resistência à flexão não sejam especificados pelas normas, optou-se por apresentá-los. Ainda assim, é possível concluir que esses valores estão dentro dos parâmetros normalmente associados ao uso no cimento. Observe-se que todas as amostras apresentaram um aumento significativo na resistência à flexão ao longo do tempo, com os valores mais baixos registrados no primeiro dia e um crescimento expressivo aos 7 dias, seguido por um aumento mais suíl até os 28 dias. A amostra GP apresentou maior resistência inicial (2,13 MPa) e manteve valores superiores às demais amostras ao longo do tempo, atingindo 8,80 MPa aos 28 dias. Por outro lado, a amostra FG-1 demonstrou menor resistência inicial (0,63 MPa), embora tenha alcançado valores próximos às demais amostras após 28 dias (8,53 MPa). Já as amostras FG-2 e FG-3 tiveram desempenhos intermediários, com pequenas variações entre si. Quanto ao espalhamento, os valores oscilaram entre 68,00 mm e 70,33 mm, sem diferenças expressivas

entre as amostras, diminuindo a trabalhabilidade da mistura relativamente constante. Assim, a análise sugere que, apesar das diferenças iniciais na resistência à flexão, todas as amostras tendem a apresentar desempenhos semelhantes ao longo do tempo.

O teste de espalhamento no cimento é utilizado para avaliar a consistência e a trabalhabilidade da mistura. Em geral o espalhamento de 20 a 50 mm indica concreto semi-seco, adequado para pré-moldados ou estruturas que excluem menor trabalhabilidade, de 50 a 100 mm indica concreto com trabalhabilidade razoável, usado em vigas, pilares e elementos estruturais, e de 100 a 150 mm indica concreto fluido, usado para lajes e situações onde é necessário preencher formas com alta fluidez. Os fatores que influenciam o resultado são a proporção de água/cimento, a presença de aditivos e ainda o tamanho, forma e distribuição granulométrica. Todas as amostras apresentaram a mesma faixa de usabilidade.

III. Conclusão

Embora amplamente utilizado na indústria cimenteira e na construção civil, a substituição integral da gipsita pelo fosfogesso enfrenta desafios que precisam ser superados para garantir seu sucesso. Tais como o processo de obtenção do ácido fosfórico que forma o fosfogesso como resíduo, as condições ambientais às quais o fosfogesso foi submetido, a idade da pilha de fosfogesso acumulado e os contaminantes que o próprio resíduo possui.

Os testes indicaram que o FG-2 com 2% de teor de SO_3 , resulta em cimentos conformes, com bom desempenho em tempos de pega e resistências mecânicas. Essa combinação oferece vantagens como a reutilização de resíduos químicos, a preservação de recursos naturais e a redução de custos, a obtenção de uma matéria-prima a um preço mais atraente sem que para isso seja necessário a exploração de recursos limitados. Conclui-se que é possível produzir cimento Portland com fosfogesso, porém, não é possível utilizar o fosfogesso de uma maneira integral, sendo necessário o emprego parcial da gipsita.

4.4. PERSPECTIVAS DE UTILIZAÇÃO

Os estudos apresentados e o estudo de caso da CSN apontaram diversas possibilidades e desafios para o uso do fosfogesso como substituição parcial ou total da gipsita na produção de cimento Portland. Com base nas análises, o fosfogesso apresenta grande potencial para substituir o gesso em proporções controladas, especialmente em cimentos Portland convencionais,

garantindo bom desempenho mecânico e conformidade com normas técnicas (Estudo A, Estudo C e Estudo de Caso CSN).

Investimentos em tecnologias que minimizem a acidez, a umidade e os contaminantes do fosfogesso são cruciais para ampliar sua aplicabilidade e torná-lo mais competitivo frente a gipsita (Estudo de Caso CSN). O uso do fosfogesso promove a reutilização de resíduos da indústria química, contribuindo para a redução de passivos ambientais e a preservação de recursos naturais, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e economia circular (Estudo C e Estudo de Caso CSN).

O Estudo B demonstrou que o fosfogesso pode ser utilizado em argamassas, melhorando propriedades técnicas como resistência à compressão e à flexão. Essa aplicação pode ampliar suas possibilidades de uso na construção civil. Apesar de resultados laboratoriais promissores, a consolidação do uso do fosfogesso depende de validação em escala industrial e adequações normativas que garantem a qualidade e segurança do material (Estudo C e Estudo de Caso CSN).

I. Semelhanças entre os estudos

Viabilidade técnica: Todos os trabalhos confirmam que o fosfogesso pode ser utilizado como regulador de pega em cimentos Portland, desde que sejam observadas suas características físico-químicas, como o teor de SO_3 , a acidez e os níveis de umidade (Estudo A, Estudo B, Estudo C e Estudo de Caso CSN). O Estudo A destacou que o FOS A apresenta comportamento semelhante ao da gipsita, enquanto o FOS B, com pH ácido e fosfatos solúveis, prolonga o período de indução da hidratação.

Benefícios ambientais e econômicos: A substituição do gesso pelo fosfogesso contribui para a reutilização de resíduos químicos, redução do impacto ambiental e dos custos de produção, além de minimizar a exploração de recursos naturais (Estudo C e Estudo de Caso CSN). O Estudo C ressaltou a preservação de recursos e redução de custos ao utilizar o fosfogesso misturado à gipsita é promissor, enquanto o Estudo de Caso CSN destacou o papel do fosfogesso na economia circular.

Necessidade de controle: O sucesso do uso do fosfogesso depende de um controle específico de suas propriedades, como acidez, umidade, contaminantes e composição química (Estudo A, Estudo B, Estudo C e Estudo de Caso CSN). Todos os estudos apontaram que o fosfogesso é tecnicamente viável, seja como substituto parcial ou total, dependendo de tratamentos e condições de fabricação.

II. Diferenças entre os estudos

Tratamento prévio: No estudo B, verificou-se que não há necessidade de tratamento para o fosfogesso em argamassas de cimento, mantendo ou até melhorando as propriedades técnicas e mecânicas das argamassas, enquanto o Estudo de Caso CSN aponta a necessidade de tecnologias de tratamento para tornar o material mais competitivo e reduzir desafios operacionais.

Proporções de mistura: O Estudo C indicou que a substituição integral do gesso não é viável, recomendando uma proporção de 25% Fosfogesso + 75% (Clínquer + Gipsita) e no Estudo B foi recomendável uma proporção de 5% de fosfogesso. O Estudo A não detalhou especificações, mas destacou a importância de ajustar a composição físico-química do fosfogesso.

Desempenho específico: O Estudo A revelou que, embora o fosfogesso possa ter desempenho semelhante ao da gipsita, as características químicas, como a presença de impurezas solúveis, precisam ser controladas. O Estudo B, destacou que o fosfogesso apresentou bom desempenho em condições de cura subaquáticas. Já o Estudo de Caso CSN apontou desafios operacionais relacionados à acidez e à umidade do material.

5. CONCLUSÕES

No geral o fosfogesso está sendo amplamente aceito na construção civil, substituindo a gipsita na produção de cimento Portland e argamassas, oferecendo uma alternativa econômica e sustentável. Melhorias tecnológicas estão permitindo o processamento mais eficiente do fosfogesso, tornando-o mais viável em diversos setores. Novas técnicas têm ajudado a reduzir impurezas ampliando suas aplicações.

Há uma perspectiva de crescimento no uso do fosfogesso à medida que as empresas buscam soluções mais sustentáveis e econômicas. A criação de usinas de beneficiamento de fosfogesso, para remoção de impurezas e redução da acidez, poderia ampliar seu uso na indústria cimenteira. Além disso, a crescente pressão por soluções de economia circular e a gestão de passivos ambientais pode incentivar o aproveitamento de resíduos como o fosfogesso em maior escala.

No entanto, seu uso enfrenta desafios como custos de tratamento, neutralização de acidez e requisitos regulatórios. Traços de radônio presentes no fosfogesso podem levantar questões ambientais e de saúde pública. Apesar dos níveis serem baixos, a preocupação com a exposição prolongada ainda gera debates sobre sua segurança. O manuseio, tratamento e descarte de fosfogesso envolve custos consideráveis, especialmente devido à necessidade de neutralização de sua acidez e remoção de impurezas. Isso pode limitar sua competitividade em relação a outros materiais.

A experiência da CSN demonstrou que o fosfogesso pode ser uma alternativa econômica à gipsita, mas sua aplicação depende de uma série de fatores, como o controle da acidez e a umidade do material. Embora tecnicamente viável, o uso de fosfogesso pode apresentar desafios operacionais e de desempenho que limitam sua adoção a longo prazo. As perspectivas para o aumento do uso do fosfogesso na produção de cimento estão diretamente ligadas à evolução das tecnologias de tratamento e ao desenvolvimento de novos processos que tornem o material mais competitivo, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. O estudo sugeriu que, com o tratamento adequado, o fosfogesso pode desempenhar um papel importante na indústria de cimento, contribuindo para a sustentabilidade e a economia circular.

Muitos estudos apontaram que o fosfogesso é tecnicamente viável, seja como substituto parcial ou total do gesso, dependendo de tratamentos e condições de fabricação.

6. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10004:2004 - Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Disponível em:<https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 02 de agosto de 2024.

ABNT NBR 6502:1995 - Rochas e Solos: Terminologia. Rio de Janeiro, 1995. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Disponível em:<https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/02/abtnbr06502-1995-rochasesolos-terminologia.pdf>. Acesso em: 12 de outubro de 2024.

ABNT NBR 10004:2004: resíduos sólidos – classificação. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. Relatório Anual de Produção de Fertilizantes. 2023. Disponível em: <https://www.anda.org.br>. Acesso em: 15 de novembro de 2024.

ANDRADE, M. Uso sustentável do fosfogesso na construção civil: previsões técnicas e impactos ambientais. Revista de Sustentabilidade Industrial, 2021.

ANDRADE NETO, J. S. et al.. Neutralização do fosfogesso com cal e a sua influência na hidratação e no desempenho mecânico de matrizes cimentícias. [S.l.]: Atena Editora, 2021. DOI: 10.22533/at.ed.8192108118.

ARAÚJO, A. P. B.; FERNANDES, André Luis Teixeira. O passivo ambiental do fosfogesso gerado nas indústrias de fertilizantes fosfatos e as possibilidades de aproveitamento. 2014. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/miltidisciplinar/o%20passivo%20ambiental.pdf>. Acesso em: 27 de dezembro de 2024.

ARGUS; IFA. Recursos e reservas de rochas fosfáticas. Relatório. Disponível em: https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/04/2023_Argus_IFA_Phosphate_Rock_Resources_and_Reserves_Final.pdf. Acesso em: 02 de agosto de 2024.

BOSCHIERO, B. N. Fosfato (P_2O_5): quanto tempo durarão as reservas minerais de rocha fosfática? 2023. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-fosfato-p2o5-reservas-rocha-fosfatica/>. Acesso em: 5 de novembro de 2024.

BOUARGANE, B., LAABOUBI, K., BIYOUNE, M. G. et al.. Procedimentos eficazes e inovadores para usar resíduos de fosfogesso em diferentes domínios de aplicação: revisão dos desafios ambientais, econômicos e avaliação do ciclo de vida. *J Mater Cycles Waste Manag* 25,1288–1308 (2023).

BRASIL, E. C.; LIMA, E. do V.; CRAVO, M. da S. Uso de gesso na agricultura. In: *Manual de gesso agrícola: aplicações e benefícios*. 2020, Capítulo 11.

CAMPOS, V. R. O conceito de materiais com graduação funcional aplicado ao desenvolvimento de gesso de alto desempenho. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade

Federal da Bahia, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Salvador, 2023.

CARVALHO, M. C. S. Calagem. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)*, 06 out. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 21 de agosto de 2024.

CHAVES, H. C. et al.. Caracterização do fosfogesso oriundo da indústria de fertilizantes fosfatados de uma usina siderúrgica localizada em Ipatinga-MG e avaliação da aplicabilidade deste como adição mineral na fabricação de argamassa. 2021. Universidade Nove de Julho.

CHAVES, H. C. Utilização do fosfogesso como matéria-prima alternativa no setor da construção civil . 2021. 89f. Dissertação (Mestrado em Cidades Inteligentes Sustentáveis) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2021.

COSTA, R. P. et al.. Avaliação do uso do fosfogesso como substituto do gesso na indústria cimenteira. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – SBCC*, 2023, Brasil. Anais [...]. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbcc/article/view/3710/3559>. Acesso em: 20 de novembro de 2024.

COSTA, R. P. et al.. *Efeitos da utilização de aceleradores alternativos na hidratação de cimentos Portland com fosfogesso*. In: ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 8., 2023. ANTAC, 2023. Disponível em:<https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/2939>. Acesso em: 17 de setembro de 2024.

COSTA, R. P. Hidratação e reologia de clínquer Portland com diferentes fontes brasileiras de sulfato de cálcio (gipsita e fosfogesso). 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Porto Alegre, 2020.

COUTINHO, A.; OLIVEIRA, R. Gestão e disposição do fosfogesso: desafios ambientais e perspectivas na indústria de fertilizantes. Revista Brasileira de Engenharia Química, 2023.

DNPM. Anuário Mineral Brasileiro. Balanço Mineral Brasileiro. Departamento Nacional da Produção Mineral, Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF ISSN 01012053. vol 34. 2014.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Utilização de Fosfogesso na Agricultura 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 27 de outubro de 2024. FARIAS, M. M. FARIAS, L. C. FARIAS, C. L. R. *Influência do gesso no tempo de pega do clínquer*. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento Ed. 02, Vol. 03, pp. 05-24. Fevereiro de 2022. ISSN: 2448-0959.

FERNANDES, F. R. C. (Ed.); LUZ, A. B.(Ed); CASTILHOS, Z. C. (Ed.). Agrominerais para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM, 2017. 380p. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/918/1/cap7.pdf>. Acesso em: 27 de dezembro de 2024.

GRACIOLI, B. *Considerações sobre a resistência mecânica e o processo de hidratação de cimentos supersulfatados (CSS) formulados com fosfogesso*. Revista Matéria, v. 22, n. 1, e11775, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0107>.

GRACIOLI, B. Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do fosfogesso para a produção de artefatos de construção civil. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de

Tecnologia e PPGTP) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1769/1/PB_PPGTP_M_Gracioli_2c%20Br una_2016.pdf. Acesso em: 02 de agosto de 2024.

GRUBER E. T.; EFFTING C.; SCHACKOW A.; MENDES G. A. “Performance evaluation of self-leveling mortars using phosphogypsum and white ceramic waste” *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, vol. 17, no. 1, e17103, 2024, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000100003>.

HENTATI, O. et al.. Fosfogesso como fertilizante do solo: Ecotoxicidade do solo alterada e elutriada para bactérias, invertebrados, algas e plantas. *Revista de Materiais Perigosos* , v. 294, p. 80-89, 30 atrás. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389415002393>. Acesso em: 15 de setembro de 2024.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Panorama da Mineração no Brasil. 2024. Disponível em: <https://www.ibram.org.br>. Acesso: 15 de novembro de 2014.

ISLAM, S. GM. Efeito do fosfogesso nas propriedades do cimento Portland. *Procedia Engenharia* , v. 744-751, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817304502>. Acesso em: 08 de setembro de 2024.

LIMA, M. T. Influência da adição de gesso e fosfogesso no tempo de pega do cimento Portland . 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 2019.

LUTKE, S. F. Lixiviação convencional e lixiviação assistida por ultrassom de elementos terras raras a partir de fosfogesso. 2023. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Química, Santa Maria, 2023.

MACHADO, A. W. Fosfato natural: tudo o que você precisa saber sobre este fertilizante. *Agrolink* , 26 conjuntos. 2024. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/adubacao-mineral/adubo---fosfato-natural_465374.html. Acesso em: 15 de setembro de 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, R. A. A.; SILVA, D. G. Estudo da previsão do uso do fosfogesso como matéria-prima na produção de materiais cerâmicos. *Revista E-xacta*. DOI:<http://dx.d.org/10.18/exata.v6i>.

OMBRELLINO, F. H.; FARIA, K. P. Estudo da utilização do fosfogesso na construção civil: pasta para revestimento e argamassa . 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Curitiba, 2014.

OLIVEIRA, J. I. Estudo do descarte fosfogesso na formulação de uma pasta para revestimento interno de edifícios. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, 2014.

PEIXOTO, C. M.; HENKES, J. A. Avaliação do uso do rejeito gerado pelo beneficiamento da rocha fosfatada na agricultura. *Revista Unicrea.*, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 66-109, jan./mar. 2023.

PEREIRA, R. R. *Incorporação do fosfogesso como substituto do gesso natural no processo de fabrico de cimento Portland*. 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química e Bioquímica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

PNLA. Portal Nacional de Licenciamento Ambiental: 2018. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Disponível em: <https://pnla.mma.gov.br/estudos-ambientais/64-licenciamento-ambiental>. Acesso em: 7 de dezembro de 2024.

QIN, X. Utilização de recursos e desenvolvimento de materiais à base de fosfogesso na engenharia civil. *Revista de Produção Mais Limpa*, v. 387, 10 fev. 2023, pág. 135858.

RASHAD, A. M. Fosfogesso como material de construção. *Journal of Cleaner Production*, v. 166, p. 732-743, 10 nov. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617317699?via=ihub>. Acesso em: 12 de novembro de 2024.

RODRIGUES, J. A. P. *Panorama atual do Arranjo Produtivo Local (APL) gessoíro da região do Araripe – PE: linha de base 2023*. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia – INT / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2023.

ROSALES, J. *Fosfogesso tratado como regulador de pega alternativo e adição mineral na produção de cimento*. Revista de Produção Mais Limpa, v. 244, p. 118752, 20 jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118752>.

ROSSASI, G. R. Determinação da atividade do rádio-226 em fosfogesso usado como adição ao clínquer por meio de medidas de radônio-222. 2021. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

SCHADECK, D. J. Estudo da técnica do uso do fosfogesso na construção civil. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8036>. Acesso em: 15 de setembro de 2024.

SILVA, H. V. Análise experimental do fosfogesso como isolamento térmico através da transferência de calor por condução. 2013. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2015.

SILVESTRE J. O. B. Fosfogesso estabilizado com cimento para aplicação na construção rodoviária: a influência do tipo de cimento na resistência e deformabilidade da mistura. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-10072017-163652/>.

SOUZA, A. E. *Balanço Mineral Brasileiro 2001 - Capítulo Fosfato*. 2012.

SOUZA, P. et al.. *Avaliação de impactos ambientais na provisão de fosfogesso por diferentes métodos*. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental, 2022.

TCHERNICHÉ, E.; YAKHNENKO, O.; CHUBUR, V.; ROUBÍK, H. Reciclagem de fosfogesso: uma revisão de questões ambientais, tendências atuais e perspectivas. *Ciências Aplicadas*, v. 11, n. 4, pág. 1575, 9 fev. 2021. DOI: 10.3390/app11041575.

ULLMANN, F. (Ed.). (2016). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley InterScience.

WEIKSNAR, K. D.; CLAVIER, K. A.; ROBEY, N. M.; TOWNSEND, T. G. Alterações nas concentrações de metais traço ao longo do ciclo de vida do fosfogesso. *Ciência do Meio Ambiente Total* , v. 851, parte 1, p. 158163, 10 dez. 2022. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.158163.

WEIKSNAR, K. D. et al. Assessing the feasibility of landfill mining in a developing economy: A case study in Nigeria. *Science of The Total Environment*, v. 827, p. 154706, 2023.

WU F., REN Y., QU G., LIU S., CHEN B. Caminho de utilização de resíduos sólidos industriais a granel: uma revisão sobre o caminho multidirecional de utilização de recursos do fosfogesso J. Environ. Gerenciar., 313(2022) , Artigo114.957 ,10.1016/j.jenvman.2022.114957.