UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL

WELTON DE ARAUJO CINTRA JUNIOR

USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E ROCHA FOSFÁTICA PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES SUSTENTÁVEIS.

Ribeirão Preto
2026

WELTON DE ARAUJO CINTRA JUNIOR

USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E ROCHA FOSFÁTICA PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES SUSTENTÁVEIS

Tese de doutorado apresentada à Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP, como requisito de avaliação para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Bortoletto-Santos
Coorientador: Prof. Lisandro Simão
Coorientadora: Profª. Drª. Isadora Alves Lovo Ismail

Ribeirão Preto
2026

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento
Técnico da Biblioteca Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto –

CINTRA JUNIOR, Welton de Araujo, 2026 -
C568u

USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E ROCHA FOSFÁTICA PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES SUSTENTÁVEIS / Welton de Araujo Cintra Junior - Ribeirão Preto, 2026.
71 f.: il. Color.

Orientador: Prof. Dr.Ricardo Bortoletto-Santos
Coorientador: Prof. Dr. Lisandro Simão
Coorientadora: Profª. Drª. Isadora Alves Lovo Ismail

Tese (Doutorado em Doutorado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2026.

1. Lodo de esgoto. 2. Rocha fosfática. 3. Fósforo. 4. Cimento. 5. Compósitos organominerais. I. Título.

WELTON DE ARAÚJO CINTRA JÚNIOR

USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E ROCHA FOSFÁTICA PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES SUSTENTÁVEIS

Tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto, para a obtenção do título de Doutor(a) em Tecnologia Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Data de defesa: 26 de agosto de 2026.

Resultado: **APROVADO**

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente gov.br RICARDO BORTOLETTO SANTOS Data: 26/08/2026 22:32:01-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	Documento assinado digitalmente gov.br JULIANA CHIARETTI NOVI Data: 27/08/2026 10:36:54-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	Documento assinado digitalmente gov.br ELLEN FRANCINE RODRIGUES Data: 27/08/2026 16:36:07-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
Prof. Dr. Ricardo Bortoletto-Santos **Presidente/UNAERP**	Profa. Dra. Juliana Chiaretti Novi **UNAERP**	Profa. Dra. Éllen Francine Rodrigues **UNAERP**
Documento assinado digitalmente gov.br WAGNER LUIZ POLITO Data: 01/09/2026 14:49:00-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	Documento assinado digitalmente gov.br RAQUEL CARDOSO MACHADO Data: 27/08/2026 08:35:38-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	
Prof Dr. Wagner Luiz Polito **USP**	Profa. Dra. Raquel Cardoso Machado **EMBRAPA**	

RIBEIRÃO PRETO
2026

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha esposa Claudia, cujo apoio constante, amor incondicional e sacrifícios diários, permitiram que esta jornada acadêmica chegasse ao fim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, na pessoa do Prof. Dr. Ricardo Bortoletto-Santos, pela paciência, incentivo constante, rigor e conhecimento científico, compartilhados durante toda a pesquisa e fundamentação deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudo.

À Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP e ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, pela vocação inovadora, pela estrutura e suporte de pesquisa, ao corpo docente, sem os quais não seria possível a conclusão desta tese.

À EMBRAPA Instrumentação de São Carlos, na pessoa do Prof. Dr. Caue Ribeiro, aos colegas de laboratório, em especial ao Prof. Ms. Vinicius Majaron, sem o qual não seria possível a realização dos experimentos necessários para esta pesquisa.

Aos amigos da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca, Luiza, Vania, Luciana e demais colegas, que sempre estiveram dispostos a colaborar, mesmo que minimamente.

A minha família, esposa Claudia. Filhos André e Rafael, e neta Mariana, pelo amor, compreensão, incentivo, paciência em momentos de ausência e que sempre foram o farol que iluminava os dias difíceis.

Epígrafe

Prefiro os que me criticam porque me corrigem aos que me elogiam porque me corrompem.

(Santo Agostinho)

Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.

(São Francisco de Assis)

A terra fornece bastante para satisfazer as necessidades de cada homem, mas não a avidez de cada homem.

(Ghandi)

RESUMO

A crescente demanda por alimentos tem intensificado o uso de fertilizantes minerais, especialmente os fosfatados, cuja produção depende de recursos naturais não renováveis e geograficamente concentrados. Paralelamente, o aumento da geração de lodo em estações de tratamento de esgoto representa um desafio ambiental, econômico e operacional, sobretudo em razão da sua destinação predominante a aterros sanitários. Apesar do potencial agronômico do lodo de esgoto, sua aplicação direta na agricultura ainda apresenta limitações, como elevada umidade, variabilidade composicional, baixa estabilidade física e menor concentração de fósforo (P) em comparação com fontes minerais fosfatadas. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar compósitos organominerais à base de lodo de esgoto, rocha fosfática e cimento Portland, avaliando os efeitos do teor de cimento e do tempo de cura sobre a composição química, a estrutura mineralógica, a resistência mecânica, a microestrutura e o comportamento de liberação de fósforo. Os compósitos foram preparados pela mistura de lodo de esgoto e rocha fosfática na proporção 1:1, em massa seca, com adição de 0, 2,5 ou 5,0% de cimento, e submetidos a tempos de cura de 0, 7, 14, 21 e 28 dias. As matérias-primas e os compósitos foram caracterizados por análise química, difração de raios X, ensaios mecânicos em texturômetro e microtomografia de raios X. Também foram conduzidos ensaios de liberação de P em água e em solução de ácido cítrico a 2%. A caracterização das matérias-primas confirmou o potencial do lodo como matriz orgânica e nutricional e da rocha fosfática como fonte mineral de P, enquanto o cimento atuou como agente estruturante. A associação entre lodo e rocha elevou o teor de P_2O_5 dos compósitos em relação ao lodo isolado, e a incorporação de cimento aumentou o teor de CaO e favoreceu a consolidação física dos compósitos organominerais, especialmente após 28 dias de cura. A microtomografia evidenciou uma estrutura interna heterogênea, indicando que a resistência mecânica depende da organização e da conectividade da matriz, e não apenas da porosidade total. Os ensaios de liberação mostraram baixa solubilização de fósforo em água, com valores inferiores a 4% do P aplicado. Em ácido cítrico a 2%, a liberação foi superior, indicando a presença de frações de P potencialmente mobilizáveis em condições ácidas e complexantes. Nos ensaios de incubação em solo, avaliados até 14 dias, o lodo e a rocha fosfática na forma pulverulenta apresentaram maior disponibilização de P em comparação aos compósitos granulados, que permaneceram abaixo de 3% do P aplicado. Esse comportamento indica menor mobilização inicial do fósforo nos grânulos, o que é compatível com uma liberação mais gradual. Os resultados demonstram que a combinação de lodo de esgoto, rocha fosfática e cimento permite a obtenção de compósitos organominerais com potencial de aplicação como fertilizantes sustentáveis de liberação gradual.

Palavras-chave: lodo de esgoto; fósforo (P); rocha fosfática; cimento; compósitos organominerais.

ABSTRACT

The growing demand for food has intensified the use of mineral fertilizers, especially phosphate fertilizers, whose production depends on non-renewable and geographically concentrated natural resources. At the same time, the increasing generation of sludge in wastewater treatment plants poses environmental, economic, and operational challenges, mainly because it is predominantly disposed of in landfills. Despite sewage sludge's agronomic potential, its direct application in agriculture remains limited by high moisture content, compositional variability, low physical stability, and lower phosphorus (P) concentrations than phosphate mineral sources. In this context, this work aimed to develop and characterize organomineral composites based on sewage sludge, phosphate rock, and Portland cement, evaluating the effects of cement content and curing time on the chemical composition, mineralogical structure, mechanical strength, microstructure, and phosphorus release behavior. The composites were prepared by mixing sewage sludge and phosphate rock in a 1:1 ratio by dry mass, with the addition of 0, 2.5, or 5.0% cement, and were subjected to curing for 0, 7, 14, 21, and 28 days. The raw materials and composites were characterized by chemical analysis, X-ray diffraction, mechanical tests with a texture analyzer, and X-ray microtomography. Tests of P release in water and in a 2% citric acid solution were also conducted. The characterization of the raw materials confirmed the potential of the sludge as an organic and nutritional matrix and the phosphate rock as a mineral source of P, while cement acted as a structuring agent. The association between sludge and rock increased the P_2O_5 content of the composites compared to sludge alone, and the incorporation of cement increased the CaO content and favored the physical consolidation of the organomineral composites, especially after 28 days of curing. Microtomography revealed a heterogeneous internal structure, indicating that mechanical strength depends on the organization and connectivity of the matrix rather than solely on total porosity. Release tests showed low phosphorus solubilization in water, with values below 4% of the applied P. In 2% citric acid, release was higher, indicating potentially mobilizable P fractions under acidic, complexing conditions. In soil incubation experiments evaluated up to 14 days, sewage sludge and phosphate rock applied in powdered form showed greater P availability than the granular composites, which remained below 3% of the applied P. This behavior indicates lower initial phosphorus mobilization from the granules, consistent with a more gradual release pattern. The results show that combining sewage sludge, phosphate rock, and cement produces organomineral composites with potential applications as sustainable slow-release fertilizers.

Keywords: sewage sludge; phosphorus (P); phosphate rock; cement; organomineral composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista geral da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca (ETE-Franca), com identificação das principais unidades operacionais (1) entrada do esgoto e gradeamento; (2) decantadores primários; (3) tanques de aeração; (4) decantadores secundários; (5) ponto de lançamento do efluente tratado; (6) biodigestores anaeróbios; (7) reservatório de biogás e posto de abastecimento; (8) sistema de desaguamento do lodo por filtro-prensa; (9) pátio de armazenamento do lodo; (10) estrutura de secagem; (11) queimadores de gás; e (12) prédio administrativo..... 29

Figura 2 – Fluxograma da estação de tratamento de esgoto de Franca 31

Figura 3 – Foto do sistema empregado para manter a umidade constante durante o preparo dos compósitos organominerais em diferentes tempos de cura 32

Figura 4 – Processo de obtenção dos compósitos organominerais 33

Figura 5 – Sistema de liberação em meio aquoso, nesse caso, em água ou em solução de ácido cítrico a 2%, utilizando um béquer como meio protetor dos materiais estudados 36

Figura 6 – Difratograma de raios X do lodo de esgoto proveniente da ETE-Franca 41

Figura 7 – Difratograma de raios X da rocha fosfática 42

Figura 8 – Difratograma de raios X do cimento Portland 43

Figura 9 – Porosidade dos compósitos organominerais determinada por microtomografia de raios X em função do teor de cimento e do tempo de cura 47

Figura 10 – Seções bidimensionais obtidas por microtomografia de raios X dos compósitos organominerais LD:RC0-7d, LD:RC2,5-7d, LD:RC5,0-21d e LD:RC0-28d, evidenciando a heterogeneidade interna da matriz, a presença de partículas minerais de maior densidade e a ocorrência de poros e trincas 49

Figura 11 – Representação das trincas e macroporos observados nos compósitos organominerais por microtomografia de raios X, com destaque para a concentração de fissuras nas interfaces entre fases mais densas, atribuídas à rocha fosfática e ao cimento, e a matriz organomineral. A imagem corresponde ao LD:RC5,0-7d 50

Figura 12 – Histogramas de distribuição de volume de poros obtidos por microtomografia de raios X para os compósitos organominerais: (a) LD:RC0-7d, (b) LD:RC2,5-7d, (c) LD:RC5,0-7d, (d) LD:RC0-14d, (e) LD:RC2,5-14d, (f) LD:RC5,0-14d, (g) LD:RC0-21d, (h) LD:RC2,5-21d, (i) LD:RC5,0-21d e (j) LD:RC0-28d 51

Figura 13 – Difratograma de raios X dos compósitos organominerais contendo 0 e 5% de cimento, com tempos de cura de 0, 14 e 28 dias 54

Figura 14 – Modelo conceitual da estrutura interna dos compósitos organominerais preparados a partir de lodo de esgoto, rocha fosfática e cimento Portland 54

Figura 15 – Liberação acumulada de fósforo em meio aquoso a partir do lodo de esgoto, da rocha fosfática e dos compósitos organominerais preparados com 2,5 e 5,0% de cimento, sem cura e após 14 e 28 dias de cura. As barras verticais representam o desvio padrão 55

Figura 16 – Liberação acumulada de fósforo em solução de ácido cítrico a 2% para o lodo de esgoto, a rocha fosfática e os compósitos organominerais preparados com 2,5 e 5,0% de cimento, sem cura e após 14 e 28 dias de cura. As barras verticais representam o desvio padrão 58

Figura 17 – Ensaio de liberação de fósforo em solo após 14 dias de incubação com lodo de esgoto, rocha fosfática e compósitos organominerais preparados com 2,5 e 5,0% de cimento, sem cura e após 14 e 28 dias de cura. As barras verticais representam o desvio padrão 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulações dos compósitos organominerais preparados a partir de lodo de esgoto, rocha fosfática e cimento 33
Tabela 2 – Quantificação elementar referente ao lodo de esgoto da ETE-Franca e da rocha fosfática de Registro/SP 39
Tabela 3 – Quantificação elementar do cimento Portland 40
Tabela 4 – Caracterização química das diferentes formulações de compósitos organominerais preparados 45
Tabela 5 – Valores máximos de força (N) aplicados aos diferentes compósitos organominerais preparados 47

LISTA DE SIGLAS

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ONU - Organização das Nações Unidas

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16
1.1. OBJETIVOS 19
1.1.1. Objetivo Geral 19
1.1.2. Objetivos Específicos 19
2. REFERENCIAL TEÓRICO 19
2.1. CRESCIMENTO POPULACIONAL, SEGURANÇA ALIMENTAR E INTENSIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL 19
2.2. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, ECONOMIA CIRCULAR E VALORIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO 21
2.3. FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS E ESTRATÉGIAS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE FOSFATOS NATURAIS 23
2.4. USO DE CIMENTO COMO AGENTE ESTABILIZANTE E INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NA LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES 26
3. MATERIAL E MÉTODOS 28
3.1. ETE-FRANCA: CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA 28
3.2. COLETA DO MATERIAL 30
3.3. PREPARO DOS COMPÓSITOS ORGANOMINERAIS 31
3.4. CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS 34
3.5. ENSAIO DE LIBERAÇÃO POR IMERSÃO 36
3.6. EXPERIMENTO DE INCUBAÇÃO NO SOLO 37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 38
4.1. CARACTERIZAÇÃO INDIVIDUAL DAS MATÉRIAS-PRIMAS 38
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS ORGANOMINERAIS 43
4.3. ENSAIOS DE LIBERAÇÃO 55
5. CONCLUSÕES 64
6. PERSPECTIVAS FUTURAS 66
REFERÊNCIAS 67

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda global por alimentos tem intensificado o uso de fertilizantes minerais, especialmente os à base de fósforo (P), nutriente essencial para o desenvolvimento vegetal e para a produtividade agrícola. Nesse contexto, o fósforo participa de processos fundamentais do metabolismo das plantas, incluindo transferência de energia, síntese de ácidos nucleicos e formação de membranas celulares. No entanto, a produção de fertilizantes fosfatados depende predominantemente da exploração de rochas fosfáticas, recursos naturais não renováveis cuja distribuição geográfica é limitada e concentrada em poucos países. Assim, este cenário de finitude das reservas minerais exige a busca por fontes secundárias de P que possam ser reintegradas ao ciclo produtivo (SCHOLZ et al., 2013; VÁCLAVKOVÁ et al., 2018).

Esse contexto tem levantado preocupações relacionadas à segurança alimentar global, à dependência geopolítica de reservas minerais e à sustentabilidade do uso de fertilizantes a longo prazo. Paralelamente à crescente demanda por fertilizantes, a expansão dos sistemas de saneamento urbano tem resultado no aumento da geração de resíduos provenientes de estações de tratamento de esgoto. Entre esses resíduos, o lodo de esgoto destaca-se pelo elevado teor de matéria orgânica e pela presença de nutrientes essenciais às plantas, especialmente nitrogênio e fósforo. Estudos recentes reforçam que o uso de lodo compostado não apenas melhora o rendimento das culturas, mas também atua positivamente na saúde do solo (LI et al., 2024; HASSAN et al., 2025).

Em muitos casos, esse material ainda é destinado a aterros sanitários ou a outras formas de disposição final, o que representa desafios ambientais e econômicos significativos para os sistemas de gestão de resíduos urbanos (EMBRAPA, 2021). Além disso, o custo operacional para a disposição deste lodo em aterros é significativo, podendo chegar a 50% do total (BETIOL & CAMARGO, 2021). Apesar do elevado potencial agronômico, a utilização do lodo de esgoto na agricultura é fortemente condicionada por aspectos regulatórios. No Brasil, a aplicação agrícola desse material foi inicialmente regulamentada pela Resolução CONAMA nº 375/2006, posteriormente atualizada pela Resolução CONAMA nº 498/2020, além de normas estaduais como a CETESB P4.230. Dessa forma, a caracterização físico-química criteriosa é essencial para garantir que esses resíduos atendam aos limites de metais potencialmente tóxicos e de patógenos exigidos pela legislação (ABREU et al., 2017).

Embora essas regulamentações sejam fundamentais para garantir a segurança ambiental e sanitária, elas têm contribuído para restringir o uso agrícola do lodo, resultando em sua destinação predominante a aterros sanitários. Essa prática implica não apenas na perda de um

material rico em nutrientes, mas também no comprometimento da vida útil dos aterros, no aumento dos custos operacionais das estações de tratamento de esgoto e em potenciais impactos ambientais, como a contaminação do solo, de águas subterrâneas e a emissão de gases. Nesse contexto, o uso agrícola do lodo de esgoto tem sido amplamente investigado como estratégia para a recuperação de nutrientes e promoção de práticas alinhadas aos princípios da economia circular. A percepção social e a aceitação pública também desempenham um papel crucial na viabilização dessas práticas de reuso (KAREF et al., 2025).

Caminada et al. (2023) afirmam que, entre as muitas estratégias utilizadas para solucionar o problema da disposição adequada do lodo de esgoto, o uso agrícola é o mais econômico e ambientalmente conveniente. Também, estudo feito a partir da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Sabesp de Botucatu, considerando os valores investidos na disposição do referido lodo, concluiu-se que, mesmo quando ofertado gratuitamente aos produtores locais, a compostagem e utilização agronômica do lodo são economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis (VISENTIN et al., 2020). Nesse cenário, o lodo de esgoto apresenta potencial agronômico relevante, pois pode contribuir para o aumento do teor de matéria orgânica no solo, bem como para o fornecimento de nutrientes. Por outro lado, sua aplicação direta na agricultura apresenta limitações importantes (BETTIOL, 2015), incluindo elevada umidade, baixa estabilidade estrutural e variabilidade composicional, fatores que dificultam o manuseio, transporte e aplicação em larga escala. Além disso, a taxa de mineralização de nutrientes no solo pode variar significativamente dependendo da estabilidade do lodo e da tecnologia de tratamento empregada (NIEKERK et al., 2005; ŻUKOWSKA et al., 2026). Embora o lodo contenha fósforo em quantidades relevantes, seus teores geralmente são inferiores aos encontrados em fertilizantes fosfatados comerciais, o que limita seu uso como fonte exclusiva desse nutriente (GAPE-ESALQ, 2025).

Uma abordagem promissora para superar essas limitações consiste na produção de fertilizantes organominerais obtidos pela combinação de resíduos orgânicos com fontes minerais de nutrientes (ESPINOSA et al., 2025). Nesse contexto, a associação entre lodo de esgoto e rochas fosfáticas naturais apresenta grande potencial tecnológico. As rochas fosfáticas constituem a principal matéria-prima utilizada na produção de fertilizantes fosfatados, sendo compostas predominantemente por minerais do grupo das apatitas. No entanto, muitas dessas rochas apresentam baixa solubilidade e limitada reatividade agronômica quando aplicadas diretamente ao solo, o que restringe sua eficiência como fonte imediata de fósforo para as plantas. Para Espinoza (2022), a incorporação de rocha fosfática ao lodo de esgoto é possível e permite tanto a incorporação de fósforo quanto sua liberação lenta no solo, produzindo

compostos comercialmente interessantes. Neste sentido, a peletização de biossólidos com fontes de fósforo tem se mostrado uma alternativa eficaz para ajustar a solubilidade e a disponibilidade de nutrientes no solo (PIASSA, 2020).

A incorporação de rochas fosfáticas em matrizes orgânicas pode favorecer sua solubilização gradual, uma vez que a decomposição da matéria orgânica gera ácidos orgânicos e compostos húmicos capazes de promover a dissolução parcial da apatita e aumentar a disponibilidade de fósforo ao longo do tempo (ESPINOZA et al., 2025). Assim, a produção de compósitos organominerais a partir da combinação de lodo de esgoto e rocha fosfática pode resultar em fertilizantes capazes de fornecer nutrientes de forma mais gradual, reduzindo perdas por lixiviação e aumentando a eficiência no uso de fósforo em sistemas agrícolas. A eficácia agronômica desses fertilizantes de liberação lenta, como observado em estudos com estruvita granular, depende diretamente da taxa de dissolução influenciada pelo pH do solo e pela granulometria do material (DEGRYSE et al., 2016). Além disso, para que esses materiais possam ser aplicados de forma eficiente no campo, é necessário garantir estabilidade física e resistência mecânica adequadas, permitindo seu manuseio, transporte e aplicação em forma de pellets ou grânulos. Assim, compósitos formados apenas pela mistura de resíduos orgânicos e minerais frequentemente apresentam baixa coesão estrutural e elevada suscetibilidade à fragmentação, o que limita sua utilização em sistemas agrícolas mecanizados.

O uso de materiais cimentícios surge como uma estratégia promissora para a estabilização estrutural de fertilizantes organominerais. O cimento Portland, quando hidratado, forma produtos cimentícios como géis de silicato de cálcio hidratado (C–S–H) e hidróxido de cálcio, capazes de atuar como fase ligante entre partículas minerais e orgânicas. A formação dessa matriz cimentícia pode promover maior coesão estrutural entre os constituintes do compósito, permitindo a obtenção de pellets mecanicamente estáveis. Além da função estrutural, a presença de uma matriz cimentícia pode influenciar diretamente a microestrutura do material, promovendo a formação de redes porosas capazes de controlar a infiltração de água e a difusão de nutrientes no interior do pellet. O controle rigoroso das condições de formação desses sólidos, semelhante aos parâmetros empregados em processos de cristalização e crescimento de cristais, é determinante para as propriedades finais do produto (GRATIERI, 2010; ZHANG et al., 2021). Dessa forma, fertilizantes organominerais estabilizados com cimento podem apresentar, simultaneamente, resistência mecânica adequada e estrutura interna favorável à liberação gradual de nutrientes.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi desenvolver e caracterizar fertilizantes organominerais granulares à base de lodo de esgoto e rocha fosfática, utilizando cimento como agente estabilizante, bem como avaliar a influência da composição e do tempo de cura sobre a microestrutura, a resistência mecânica e o comportamento de liberação de nutrientes, visando à obtenção de fertilizantes sustentáveis, com potencial de liberação gradual de fósforo e baseados na valorização de resíduos urbanos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar química, física e mineralogicamente o lodo de esgoto proveniente da ETE de Franca e avaliar seu potencial de utilização em formulações fertilizantes organominerais;
- Produzir compósitos organominerais a partir da combinação de lodo de esgoto, rocha fosfática e diferentes teores de cimento;
- Avaliar o efeito do teor de cimento e do tempo de cura nas propriedades físicas e estruturais dos pellets;
- Caracterizar a microestrutura dos materiais por técnicas adequadas (ex.: microtomografia e análise de porosidade);
- Determinar a resistência mecânica dos compósitos organominerais produzidos;
- Investigar o comportamento de liberação de nutrientes, com ênfase no fósforo;
- Correlacionar a microestrutura com as propriedades mecânicas e o perfil de liberação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. CRESCIMENTO POPULACIONAL, SEGURANÇA ALIMENTAR E INTENSIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL

O crescimento populacional mundial tem sido um dos principais fatores responsáveis pelo aumento da demanda por alimentos nas últimas décadas. No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estimou recentemente que a população atingiu a marca de 213,4 milhões de habitantes em agosto de 2025. Considerando o censo demográfico de 2022, que apontava aproximadamente 203,08 milhões de habitantes, observa-se que, em apenas três anos, houve um crescimento da ordem de 5,08% (IBGE, 2022). Em escala global, a população

ultrapassou 8 bilhões em 2024 e, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), poderá atingir 9,7 bilhões até 2050. Esse aumento, aliado às mudanças climáticas, impõe desafios severos aos sistemas agrícolas, exigindo maior eficiência na utilização de recursos naturais e tecnologias que ampliem a produtividade de forma sustentável.

De acordo com a Food and Agriculture Organization (FAO, 2023), a demanda global por alimentos deve crescer a um ritmo de 1,3% ao ano, superando o crescimento populacional anual de 1,1%. Esse cenário evidencia a necessidade de garantir a segurança alimentar, definida como a condição em que todas as pessoas têm acesso físico, social e econômico a alimentos suficientes, seguros e nutritivos. No entanto, assegurar essa disponibilidade é um desafio diante da degradação dos solos e da escassez de água e de energia.

Historicamente, o aumento da produção esteve associado à Revolução Verde, que promoveu ganhos expressivos por meio de cultivares de alto rendimento e do uso intensivo de fertilizantes minerais. Contudo, esse modelo gerou preocupações quanto aos impactos ambientais e à baixa eficiência no aproveitamento dos nutrientes. Freitas (2022) afirma que, no Brasil, a área agrícola cresceu, em média, 2% entre 1995 e 2019, atingindo 7,5% em algumas regiões. Embora a expansão de área tenha contribuído para a produção, ela encontra limites impostos por restrições ambientais e custos econômicos, o que reforça a urgência da Intensificação Sustentável. Este conceito refere-se ao aumento da produtividade sem a expansão proporcional de áreas cultivadas, preservando os serviços ecossistêmicos.

Um ponto crítico para essa intensificação é a dependência de insumos externos. Em 2024, segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), o Brasil produziu cerca de 7,04 milhões de toneladas de fertilizantes, mas importou mais de 41,34 milhões de toneladas. Isso significa que apenas 14,55% da demanda nacional é suprida internamente. A vulnerabilidade das cadeias globais, exacerbada por conflitos em regiões produtoras, como a Rússia e a Ucrânia, torna estratégica a busca por fontes alternativas de nutrientes.

Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos urbanos, especificamente o lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), surge como uma solução promissora. Estudos indicam que o lodo de esgoto, quando devidamente estabilizado, apresenta teores significativos de nitrogênio (N), fósforo (P) e matéria orgânica, essenciais à fertilidade do solo (ŻUKOWSKA et al., 2026; KAREF et al., 2025). A transformação desse resíduo em fertilizante não apenas mitiga o impacto ambiental do descarte de resíduos urbanos, como também promove a reciclagem de nutrientes, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais importados e caros (BALKRISHNA et al., 2025). Assim, a valorização do lodo de esgoto como insumo agrícola, por meio da integração de tecnologias de estabilização e peletização, é um elemento central

para a intensificação sustentável da agricultura brasileira, garantindo a produtividade necessária para alimentar uma população crescente, em uma perspectiva de economia circular.

2.2. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, ECONOMIA CIRCULAR E VALORIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

A busca por sistemas produtivos mais sustentáveis tem sido amplamente discutida no contexto global, especialmente após a consolidação da Agenda 2030 das Nações Unidas, que estabelece os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esses objetivos representam um conjunto de metas globais voltadas à promoção do desenvolvimento econômico, social e ambiental de forma integrada. Entre os ODS diretamente relacionados à produção de alimentos e à gestão de recursos naturais, destacam-se o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Esses objetivos reforçam a necessidade de promover práticas que integrem a produção agrícola eficiente, a gestão adequada de resíduos e o uso sustentável de recursos naturais.

Nesse contexto, o conceito de economia circular tem ganhado destaque como estratégia capaz de promover o reaproveitamento de recursos e a redução de desperdícios nos sistemas produtivos. Diferentemente do modelo linear tradicional de produção, baseado nas etapas de extração, produção, consumo e descarte, a economia circular busca reinserir materiais e nutrientes nos ciclos produtivos, reduzindo a geração de resíduos e aumentando a eficiência no uso dos recursos. No setor agrícola, esse conceito tem sido aplicado principalmente por meio da recuperação de nutrientes presentes em resíduos orgânicos e urbanos, permitindo sua reutilização como insumos agrícolas. Entre os resíduos gerados nos sistemas urbanos, o lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) apresenta grande potencial para recuperação de nutrientes. Esse material contém quantidades relevantes de matéria orgânica e de elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Diante da crescente demanda por fertilizantes e da necessidade de soluções mais sustentáveis para a produção de alimentos, o uso do lodo de esgoto como insumo agrícola tem sido amplamente discutido na literatura científica.

Assim, a produção e utilização de fertilizantes continuam sendo uma das ferramentas mais importantes para garantir a segurança alimentar global. Por outro lado, a atual condição geopolítica mundial tem evidenciado a vulnerabilidade das cadeias de suprimento de fertilizantes. Países como a Rússia e a Ucrânia desempenham um papel relevante na produção e exportação de insumos utilizados na fabricação de fertilizantes, e conflitos geopolíticos

envolvendo essas regiões têm impactado diretamente o mercado global desses insumos. Diante desse cenário, torna-se cada vez mais necessária a busca por soluções locais capazes de reduzir a dependência externa e aumentar a segurança no fornecimento de nutrientes à agricultura (KIBROM et al., 2025).

Nesse contexto, o aproveitamento do lodo produzido em Estações de Tratamento de Esgoto apresenta-se como uma alternativa promissora. Esse material apresenta grande potencial para fornecimento de nutrientes essenciais às plantas e pode contribuir para o desenvolvimento de fertilizantes alternativos e sustentáveis. No entanto, apesar de seu potencial agronômico, a utilização do lodo de esgoto na agricultura envolve desafios relacionados à regulamentação, à aceitação social e ao manejo adequado desse resíduo. A percepção pública, muitas vezes marcada pela hesitação quanto à origem do material, exige estratégias de comunicação e demonstrações técnicas de segurança para que o reuso seja plenamente aceito (KAREF et al., 2025).

No Brasil, a aplicação agrícola de lodo de esgoto passou a ser regulamentada pela Resolução CONAMA nº 375/2006, que estabeleceu critérios e restrições para sua utilização, permitindo apenas a aplicação de lodos classificados como Classe A, conforme parâmetros microbiológicos e químicos definidos na legislação. Posteriormente, essa resolução foi revogada pela Resolução CONAMA nº 498, publicada em 19 de agosto de 2020, que manteve grande parte das diretrizes anteriores. No Estado de São Paulo, a utilização agrícola do lodo de esgoto é regulada pela Norma CETESB P4.230, atualmente em sua segunda edição (2021), que estabelece critérios ainda mais restritivos para a aplicação desse material em solos agrícolas. Estudos de caracterização realizados em diversas ETEs brasileiras demonstram que, embora o lodo possua alto valor nutricional, o cumprimento desses limites normativos é o principal gargalo à sua reciclagem em larga escala (ABREU et al., 2017).

Essas restrições regulatórias, embora importantes para garantir a segurança ambiental e sanitária, têm contribuído para restringir o uso agrícola do lodo de esgoto em diversas regiões do país. Como consequência, grande parte do lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto é destinada a aterros sanitários. Essa prática representa não apenas a perda de um recurso potencialmente valioso, mas também implica elevados custos operacionais para os sistemas de saneamento e contribui para a redução da vida útil dos aterros.

A quantidade de lodo gerada diariamente nos sistemas de tratamento de esgoto é significativa. Como exemplo, na ETE Franca, localizada no Estado de São Paulo e responsável pelo tratamento de aproximadamente 70% do esgoto produzido no município de Franca, são geradas cerca de 80 toneladas de lodo por dia, considerando uma população urbana de

aproximadamente 352 mil habitantes (IBGE, 2022). Esse cenário evidencia a necessidade de desenvolver alternativas tecnológicas que permitam a valorização desse resíduo e sua reinserção nas cadeias produtivas. No Brasil, segundo o SNIS, estima-se que sejam geradas cerca de 3090 toneladas de lodo de esgoto diariamente.

Diante desse contexto, o aproveitamento do lodo de esgoto na agricultura surge como uma alternativa ambientalmente vantajosa e economicamente promissora, em consonância com o que preconiza a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10). Além de contribuir para a redução da quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários, essa estratégia permite a reciclagem de nutrientes e de matéria orgânica, promovendo benefícios agronômicos e ambientais. Estudos recentes indicam que, quando manejado adequadamente, o uso agrícola do lodo de esgoto pode representar uma alternativa mais sustentável em comparação com outras formas de disposição, como a incineração, que pode gerar impactos ambientais significativos, especialmente relacionados à emissão de poluentes atmosféricos (D'IMPORZANO; ADANI, 2023). Da mesma forma, diversos estudos indicam que a aplicação controlada de lodo de esgoto em solos agrícolas pode contribuir para a melhoria da fertilidade do solo, sem apresentar riscos significativos quando respeitados os critérios técnicos e regulatórios estabelecidos (ITICESCU et al., 2024).

Complementarmente, experimentos de longo prazo demonstram que a aplicação contínua de lodo de esgoto granulado como fertilizante mantém valores nutricionais equivalentes aos de fertilizantes orgânicos tradicionais, com transferência mínima de metais pesados para as culturas (NOGUCHI & ITO, 1992). Além disso, o uso de lodo compostado tem se mostrado eficaz não apenas no fornecimento de N e P, mas também no estímulo à atividade microbiana e na melhoria da retenção de umidade do solo (BALKRISHNA et al., 2025; LI et al., 2024). Assim, o desenvolvimento de tecnologias capazes de transformar esse resíduo em fertilizantes ou condicionadores de solo representa uma abordagem alinhada aos princípios da economia circular e aos objetivos globais de sustentabilidade.

2.3. FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS E ESTRATÉGIAS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE FOSFATOS NATURAIS

Os fertilizantes organominerais têm se destacado como uma alternativa promissora para o manejo sustentável da fertilidade do solo, especialmente em sistemas agrícolas que buscam maior eficiência no uso de nutrientes e redução da dependência de fertilizantes minerais convencionais. Esses fertilizantes são obtidos pela combinação de fontes orgânicas, como resíduos agroindustriais ou urbanos, com fertilizantes minerais, resultando em produtos capazes

de fornecer nutrientes às plantas de forma mais equilibrada e gradual. A utilização de matrizes poliméricas biodegradáveis e de sistemas de revestimento tem sido uma estratégia eficaz para modular a cinética de liberação desses nutrientes, reduzindo as perdas ambientais (MAJARON et al., 2020; BORTOLETTO-SANTOS et al., 2020).

A presença de matéria orgânica nesses fertilizantes contribui não apenas para o fornecimento de nutrientes, mas também para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A matéria orgânica pode atuar na melhoria da estrutura do solo, aumentar a capacidade de retenção de água e favorecer a atividade microbiológica, fatores que contribuem para maior eficiência no aproveitamento de nutrientes pelas plantas. Além disso, a interação entre a fração orgânica e os fertilizantes minerais pode favorecer processos de complexação, de troca iônica e de modulação da disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo. A incorporação de nanomateriais e argilas em matrizes orgânicas, como o poliuretano de mamona, permite controlar a difusão de nutrientes por meio da membrana do fertilizante, potencializando o efeito residual no solo (BORTOLETTO-SANTOS et al., 2020).

Entre os nutrientes de maior importância para a produção agrícola, destaca-se o fósforo (P), elemento essencial para diversos processos fisiológicos das plantas, incluindo a transferência de energia, a síntese de ácidos nucleicos e o desenvolvimento radicular. No entanto, a disponibilidade de fósforo no solo é frequentemente limitada devido a processos de fixação química e à baixa solubilidade de muitas fontes minerais desse nutriente. Estudos recentes mostram que a formação de compósitos de ureia e hidroxiapatita pode ser uma via para reduzir a complexação de P em solos tropicais, mantendo o nutriente disponível por mais tempo (GIROTO et al., 2024).

As rochas fosfáticas constituem a principal matéria-prima utilizada na produção de fertilizantes fosfatados. Essas rochas são compostas predominantemente por minerais do grupo das apatitas, que apresentam diferentes graus de substituição química e de cristalinidade. Apesar de seu elevado teor de fósforo total, muitas rochas fosfáticas apresentam baixa solubilidade em condições naturais de solo, o que limita sua eficiência agronômica quando aplicadas diretamente como fertilizante. Além disso, a baixa reatividade de fosfatos naturais está relacionada a diversos fatores, incluindo a estrutura cristalina da apatita, o grau de substituição isomórfica no mineral e as condições químicas do solo, como a acidez. Em solos tropicais altamente intemperizados, como muitos solos brasileiros, processos de adsorção e precipitação podem reduzir ainda mais a disponibilidade de fósforo para as plantas, tornando necessário o desenvolvimento de estratégias que aumentem a eficiência agronômica dessas fontes minerais (PAVINATO & CIBPRIANO, 2025)

Diferentes estratégias têm sido investigadas com o objetivo de aumentar a disponibilidade de fósforo proveniente de rochas fosfáticas naturais. Entre essas estratégias, destacam-se a acidulação parcial, a redução de tamanho de partícula, o uso de processos biológicos de solubilização e a associação dessas rochas a materiais orgânicos. Nesse sentido, a ativação biológica de compósitos contendo enxofre elementar e rocha fosfática, mediada pela ação do fungo *Aspergillus niger*, promove uma acidificação local que solubiliza gradualmente o fósforo e micronutrientes, tornando-os disponíveis para as plantas sem a necessidade de processos industriais agressivos (GUIMARÃES et al., 2018; MAJARON et al., 2022). Assim, a incorporação de matéria orgânica pode favorecer a dissolução gradual dos fosfatos naturais, uma vez que a decomposição dos resíduos orgânicos gera ácidos orgânicos e outros compostos capazes de promover a solubilização parcial dos minerais fosfatados.

Nesse contexto, a produção de fertilizantes organominerais a partir da combinação de resíduos orgânicos com rochas fosfáticas naturais surge como uma abordagem promissora para aumentar a eficiência do uso do fósforo em sistemas agrícolas. Dessa forma, a matriz orgânica pode atuar como um meio favorável para processos de solubilização gradual do fósforo, ao mesmo tempo em que contribui para a melhoria da qualidade do solo, o que permite não apenas o aproveitamento de resíduos orgânicos, mas também o uso de fontes minerais de fósforo de menor custo e com menor processamento industrial.

Além da composição química, a forma física dos fertilizantes desempenha um papel fundamental em sua eficiência agronômica e viabilidade operacional. A produção de fertilizantes na forma granular ou em pellets apresenta diversas vantagens em relação à aplicação de materiais pulverulentos. Fertilizantes granulados apresentam melhor desempenho em operações de transporte, armazenamento e aplicação mecanizada, além de proporcionarem uma distribuição mais uniforme no campo. A tecnologia de multicamadas e o uso de revestimentos, como a zeína, permitem a integração de diversos nutrientes em um único grânulo, garantindo a integridade mecânica necessária à aplicação em campo (BORTOLETTO-SANTOS et al., 2018; BERNARDO et al., 2018). Também, a resistência mecânica dos grânulos ou pellets constitui um parâmetro importante para garantir a integridade do fertilizante durante as etapas de manuseio e aplicação. Materiais com baixa resistência mecânica podem levar à fragmentação durante o transporte ou aplicação, comprometendo a uniformidade da distribuição e a eficiência do fertilizante. Dessa forma, o desenvolvimento de fertilizantes granulares com estabilidade estrutural adequada representa um aspecto relevante para viabilizar o uso de novos materiais fertilizantes obtidos a partir de resíduos e de fontes minerais alternativas.

De maneira geral, a disponibilidade global de fósforo e a dependência de fontes minerais concentradas geograficamente têm sido amplamente discutidas na literatura científica e em relatórios internacionais. As reservas economicamente exploráveis de rochas fosfáticas distribuem-se desigualmente no mundo, concentrando-se em poucos países. De acordo com estimativas do United States Geological Survey (USGS), as reservas globais de rochas fosfáticas são da ordem de 70 bilhões de toneladas, sendo que cerca de 70% dessas reservas estão localizadas no Marrocos e no Saara Ocidental, enquanto países como a China, o Egito, a Argélia e a Síria também possuem reservas significativas. Essa forte concentração geográfica gera preocupações quanto à segurança do abastecimento de fertilizantes fosfatados, especialmente para países que dependem majoritariamente da importação desses insumos. No caso do Brasil, apesar da existência de algumas reservas de rochas fosfáticas, a produção nacional ainda é insuficiente para atender à demanda agrícola, o que resulta em elevada dependência de fertilizantes importados. Diante desse cenário, o desenvolvimento de estratégias que permitam aumentar a eficiência do uso de fósforo, bem como o aproveitamento de fontes alternativas e de menor custo, torna-se fundamental para garantir maior sustentabilidade e segurança no fornecimento desse nutriente essencial à produção agrícola.

2.4. USO DE CIMENTO COMO AGENTE ESTABILIZANTE E INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NA LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES

O desenvolvimento de fertilizantes alternativos obtidos a partir de resíduos orgânicos e minerais exige não apenas a definição adequada da composição química dos materiais, mas também o controle de suas propriedades físicas e estruturais. Entre essas propriedades, destacam-se a estabilidade mecânica, a integridade estrutural e a microestrutura interna dos materiais, fatores que influenciam diretamente o comportamento dos fertilizantes durante o transporte, o armazenamento e a aplicação no solo (KABIRI et al., 2018; HOU et al., 2021). Nesse contexto, o uso de agentes ligantes tem sido amplamente investigado como estratégia para promover a estabilização estrutural de fertilizantes granulados ou em forma de pellets (ESPINOZA et al., 2023; SANTOS JÚNIOR et al., 2025). Entre os diferentes materiais utilizados para essa finalidade, destacam-se os compostos cimentícios, que apresentam elevada capacidade de ligação entre partículas sólidas e podem contribuir para a formação de estruturas mais resistentes e estáveis (MARTIN, 1971; FERGUSON, 1977; BHARATHI et al., 2011).

O cimento Portland é um material amplamente utilizado na engenharia civil devido à sua capacidade de formar estruturas sólidas por meio de reações de hidratação. Durante o processo de hidratação, os principais constituintes do cimento reagem com a água, formando

produtos hidratados, entre os quais se destacam os géis de silicato de cálcio hidratado (C–S–H) e o hidróxido de cálcio (CUESTA et al., 2018; JOHN et al., 2023). Esses produtos hidratados atuam como fase ligante, promovendo a coesão entre as partículas sólidas e formando uma matriz consolidada com elevada estabilidade mecânica (CUESTA et al., 2018; JOHN et al., 2023).

A incorporação de cimento em materiais compósitos tem sido explorada em diversas aplicações, incluindo a estabilização de solos, a produção de materiais cerâmicos e o desenvolvimento de matrizes estruturais para o encapsulamento de diferentes compostos. No contexto de fertilizantes, a utilização de cimento pode favorecer a formação de pellets estruturalmente estáveis, reduzindo a fragmentação durante o transporte e garantindo maior integridade física do material na aplicação agrícola (MARTIN, 1971; FERGUSON, 1977; BHARATHI et al., 2011). Além da função estrutural, a presença de uma matriz cimentícia pode influenciar diretamente a microestrutura do material formado. Durante o processo de hidratação e cura do cimento, forma-se uma rede sólida que envolve e interliga as partículas do compósito, podendo gerar diferentes níveis de porosidade e distribuições de poros no interior do material (CUESTA et al., 2018; JOHN et al., 2023). Dessa forma, a microestrutura resultante depende de diversos fatores, incluindo a proporção entre os componentes da mistura, o teor de água empregado na preparação e as condições de cura do material.

A porosidade interna dos materiais fertilizantes desempenha um papel fundamental no controle da permeação de água e da difusão de nutrientes. Materiais com elevada porosidade podem favorecer a penetração de água no interior da estrutura, promovendo a dissolução gradual dos nutrientes presentes na matriz. Por outro lado, estruturas excessivamente compactas podem dificultar a difusão de água e reduzir a taxa de liberação de nutrientes. Nesse sentido, a relação entre microestrutura e comportamento de liberação de nutrientes tem sido amplamente investigada no desenvolvimento de fertilizantes de liberação gradual, de modo que a distribuição de poros, o tamanho das partículas e a conectividade entre os poros influenciam diretamente os mecanismos de transporte de água e de difusão de íons no interior do material (BHARATHI et al., 2011; LAWRENCIA et al., 2021; ESPINOZA et al., 2023). Esses fatores podem determinar a velocidade de dissolução de nutrientes e, consequentemente, a disponibilidade desses elementos para as plantas ao longo do tempo.

Dessa forma, o controle da microestrutura de fertilizantes obtidos a partir de compósitos organominerais torna-se um aspecto fundamental para o desenvolvimento de materiais capazes de apresentar, simultaneamente, estabilidade mecânica adequada e comportamento de liberação gradual de nutrientes (ESPINOZA et al., 2023; HOU et al., 2021). A utilização de agentes

cimentícios pode contribuir para a formação de estruturas granulares mais resistentes, ao mesmo tempo em que permite a formação de uma rede porosa capaz de controlar a infiltração de água e a liberação de nutrientes no solo (FERGUSON, 1977; BHARATHI et al., 2011). Assim, a compreensão da relação entre composição, microestrutura e propriedades mecânicas dos fertilizantes torna-se essencial para o desenvolvimento de novos materiais fertilizantes, obtidos por meio da valorização de resíduos e de fontes minerais alternativas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ETE-FRANCA: CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA

A Estação de Tratamento de Esgoto de Franca (ETE-Franca), administrada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), foi selecionada como unidade de referência para o desenvolvimento deste trabalho em razão de suas características operacionais, da quantidade de lodo gerada e da configuração de sua planta. Além da disponibilidade do biossólido utilizado nos experimentos, a escolha considerou a possibilidade de, futuramente, integrar uma rota de produção de compósitos organominerais à infraestrutura já existente na unidade, reduzindo a necessidade de alterações estruturais de grande porte.

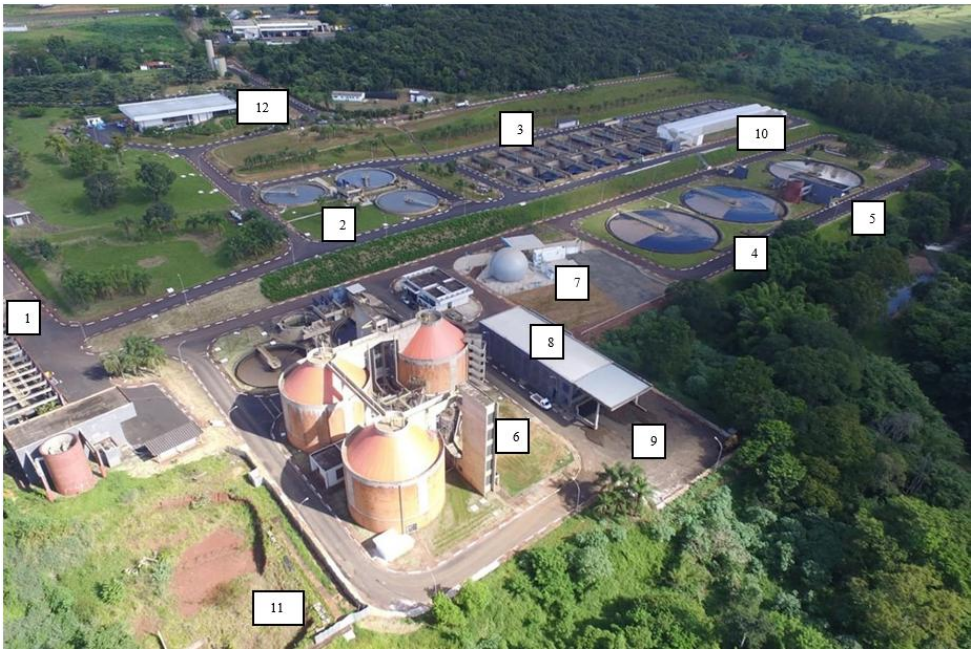
A ETE-Franca gera cerca de 80 toneladas de lodo de esgoto por dia. Considerando um teor de sólidos em torno de 20%, essa quantidade corresponde, aproximadamente, a 16 toneladas diárias de matéria sólida potencialmente disponível para processos de valorização. Essa escala de geração evidencia, simultaneamente, o desafio associado à destinação desse resíduo e a disponibilidade de matéria-prima para o desenvolvimento de alternativas tecnológicas voltadas ao seu aproveitamento.

A seleção da ETE-Franca também está relacionada ao histórico de interesse no aproveitamento agrícola do lodo gerado na unidade. No entanto, mudanças nos requisitos sanitários e regulatórios aplicáveis ao uso agrícola de lodos de esgoto tornaram necessária a adoção de estratégias de tratamento e transformação capazes de conferir maior segurança, estabilidade e facilidade de aplicação ao material. Nesse contexto, o desenvolvimento de compósitos organominerais constitui uma alternativa para agregar valor ao lodo, associando sua fração orgânica e nutricional a uma fonte mineral de fósforo e a um agente estruturante.

Além do volume de lodo disponível, a organização física da ETE-Franca favorece a concepção de uma rota integrada para seu processamento. A unidade dispõe de biodigestores anaeróbios para estabilização do lodo, sistema de desaguamento por filtro-prensa, pátio de armazenamento e estrutura destinada à secagem, etapas diretamente relacionadas às operações

necessárias ao preparo de materiais organominerais. A Figura 1 apresenta uma vista geral da ETE-Franca, com a identificação das principais unidades operacionais relacionadas ao tratamento do esgoto e à geração e ao manejo do lodo.

Figura 1. Vista geral da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca (ETE-Franca), com identificação das principais unidades operacionais: (1) entrada do esgoto e gradeamento; (2) decantadores primários; (3) tanques de aeração; (4) decantadores secundários; (5) ponto de lançamento do efluente tratado; (6) biodigestores anaeróbios; (7) reservatório de biogás e posto de abastecimento; (8) sistema de desaguamento do lodo por filtro-prensa; (9) pátio de armazenamento do lodo; (10) estrutura de secagem; (11) queimadores de gás; e (12) prédio administrativo.



A configuração da unidade permite observar que as etapas de geração, estabilização, desaguamento e armazenamento do lodo estão fisicamente integradas à planta de tratamento. Essa característica foi considerada relevante para a pesquisa, pois permite estabelecer uma relação entre o desenvolvimento experimental dos compósitos em escala laboratorial e sua possível produção em maior escala, utilizando o lodo obtido após a digestão anaeróbia e o desaguamento.

Dessa forma, a escolha da ETE-Franca não se baseou exclusivamente na disponibilidade de lodo para coleta, mas também na representatividade da quantidade de resíduo gerada e na existência de condições operacionais que permitem discutir sua valorização dentro da própria cadeia de tratamento de esgoto. Essa abordagem aproxima o desenvolvimento experimental de uma possível aplicação tecnológica, alinhando a pesquisa aos princípios de recuperação de nutrientes, valorização de resíduos e economia circular.

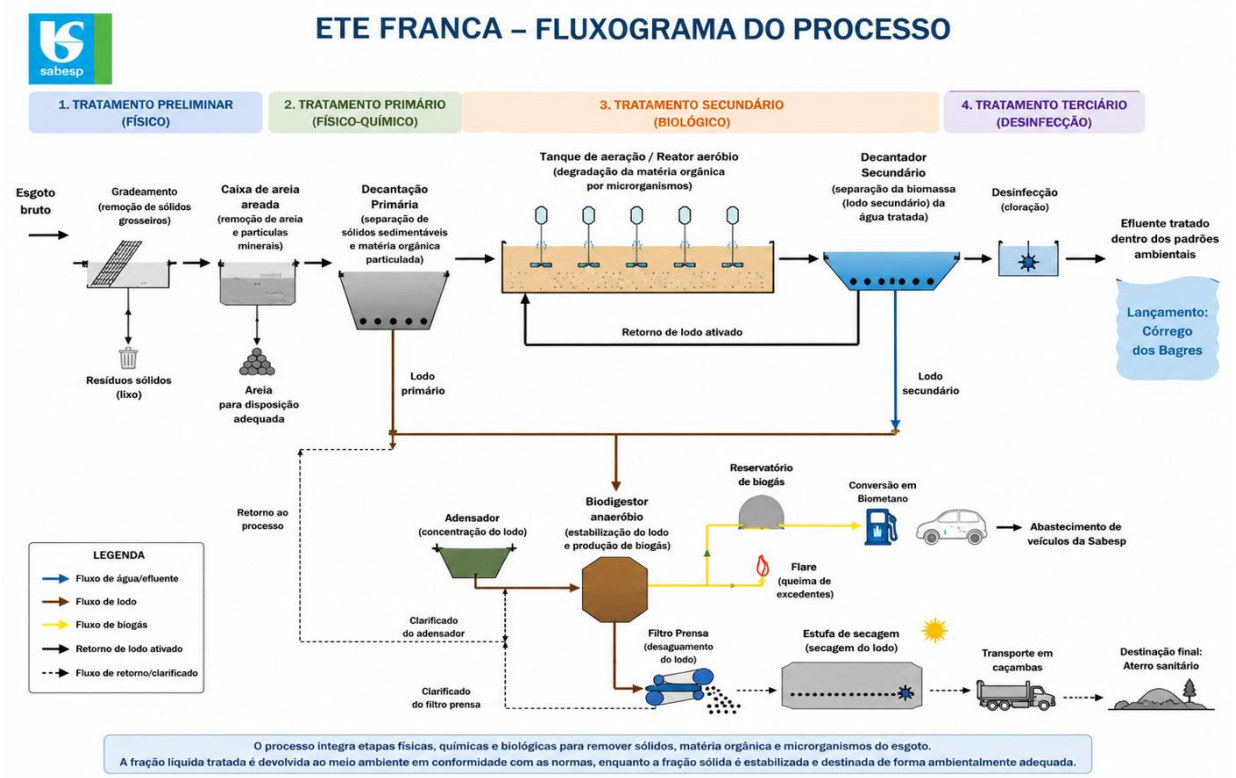
3.2. COLETA DO MATERIAL

O lodo de esgoto utilizado no trabalho foi obtido na Estação de Tratamento de Esgoto de Franca (ETE-Franca), situada no município de Franca, São Paulo (47°25'09,22" Oeste - 20°33'40,68" Sul), e administrada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). O material de interesse foi o biossólido gerado após a etapa de digestão anaeróbica e subsequente desaguamento por filtro-prensa. A Figura 2 apresenta o fluxograma geral da ETE-Franca.

A ETE-Franca entrou em operação em 1998 e trata o esgoto por meio de etapas físicas, físico-químicas, biológicas e de desinfecção. Inicialmente, o esgoto bruto passa por tratamento preliminar, no qual ocorre a remoção de sólidos grosseiros por gradeamento e de partículas minerais, como areia, por meio de unidades de separação física. Em seguida, o efluente é direcionado ao tratamento primário, etapa na qual parte dos sólidos sedimentáveis e da matéria orgânica particulada é removida por decantação. Posteriormente, no tratamento secundário, a matéria orgânica remanescente é degradada biologicamente por microrganismos, o que resulta na formação de biomassa e na produção de gases, como metano e dióxido de carbono. Após a separação entre a fração líquida tratada e a fração sólida, o efluente passa por uma etapa de desinfecção e retorna ao Córrego dos Bagres dentro dos padrões ambientais estabelecidos, com eficiência de remoção de matéria orgânica superior a 90%.

A fração sólida gerada durante o tratamento é encaminhada para biodigestores anaeróbios, onde ocorre a estabilização biológica do lodo. Após essa etapa, o material é submetido ao desaguamento em filtro-prensa, processo responsável pela redução do teor de umidade e pela obtenção do lodo de esgoto em forma pastosa ou semissólida. Atualmente, esse material é acondicionado em caçambas e destinado ao aterro sanitário. Adicionalmente, o biogás gerado no processo de digestão anaeróbia é tratado e convertido em biometano, utilizado no abastecimento de veículos da própria SABESP.

Figura 2. Fluxograma da estação de tratamento de esgoto de Franca.



Fonte: elaborada pelo autor, 2026.

A coleta do lodo foi realizada diretamente na saída do sistema de desaguamento, utilizando recipientes de polietileno de 25 L, previamente higienizados. Após o preenchimento, os recipientes foram vedados, identificados e encaminhados ao Laboratório de Processos e Materiais (ProMat) da Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), em Ribeirão Preto (SP). O material permaneceu armazenado em condições controladas até o início das etapas de preparo, caracterização e formulação dos compósitos organominerais.

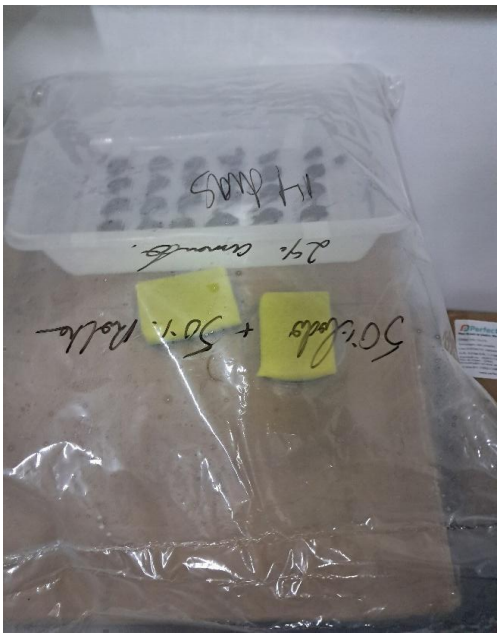
3.3. PREPARO DOS COMPÓSITOS ORGANOMINERAIS

A produção dos compósitos organominerais foi realizada por meio da homogeneização do lodo de esgoto com a rocha fosfática proveniente de Registro/SP. Para isso, a umidade do lodo bruto foi previamente determinada em uma balança de umidade MARTE ID200, o que também permitiu o cálculo da massa equivalente de sólidos secos presentes no material úmido. A partir desse valor, padronizou-se a massa a ser utilizada no preparo dos compósitos organominerais.

A formulação base dos compósitos organominerais foi preparada pela mistura do lodo (em massa seca equivalente) com a rocha fosfática, na proporção de 1:1. Essa mistura inicial serviu como matriz para a incorporação do aditivo estruturante. O aditivo utilizado foi cimento

Portland, adicionado nas porcentagens de 0% (controle), 2,5% ou 5%, calculadas em relação à massa total do lodo + rocha previamente homogeneizados. Também foram avaliados diferentes tempos de cura do compósito preparado, mantendo-se o sistema em sacos plásticos vedados com esponjas úmidas, conforme mostra a Figura 3, para manter a umidade constante. Os tempos de cura avaliados foram de 7, 14, 21 e 28 dias. Vale destacar que as quantidades correspondentes de lodo, rocha fosfática e aditivo foram transferidas para um béquer e homogeneizadas manualmente até obter uma mistura uniforme.

Figura 3. Foto do sistema empregado para manter a umidade constante durante o preparo de compósitos organominerais em diferentes tempos de cura.



Após a homogeneização, a mistura úmida foi transferida para seringas plásticas de grande volume, que foram utilizadas como moldes extrusores. A aplicação de pressão no êmbolo permitiu a extrusão da massa em filamentos contínuos, semelhantes a pequenos "macarrões". Esses filamentos foram distribuídos uniformemente sobre bandejas de aço inox, evitando sobreposições e garantindo a secagem adequada.

Os compósitos extrusados foram então submetidos à secagem em estufa de circulação de ar a 60 °C por 24 horas, garantindo a remoção da umidade residual e a consolidação física das estruturas. Após a secagem, o material foi fragmentado ou granulado, conforme a necessidade das etapas subsequentes de caracterização. A Figura 4 ilustra o processo de obtenção dos compósitos organominerais, bem como as formulações obtidas, descritas na Tabela 1.

Figura 4. Processo de obtenção de compósitos organominerais.

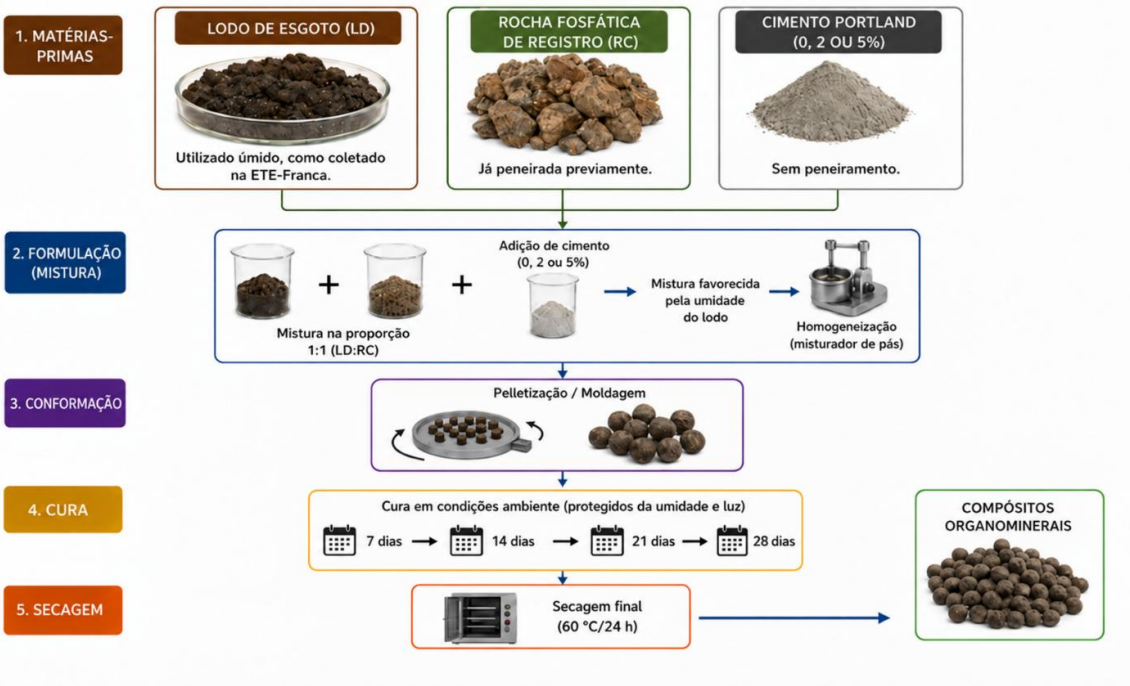


Tabela 1. Formulações de compósitos organominerais preparados a partir de lodo de esgoto, rocha fosfática e cimento.

Código	Lodo (% massa seca)	Rocha Fosfática (% massa seca)	Aditivo	Percentual de Aditivo*	Tempo de cura (dias)
LD:RC$_0$	50%	50%	-	0%	0
LD:RC$_0$-7d	50%	50%	-	0%	7
LD:RC$_0$-14d	50%	50%	-	0%	14
LD:RC$_0$-21d	50%	50%	-	0%	21
LD:RC$_0$-28d	50%	50%	-	0%	28
LD:RC$_{2,5}$	50%	50%	Cimento Portland	2,5%	0
LD:RC$_{2,5}$-7d	50%	50%	Cimento Portland	2,5%	7
LD:RC$_{2,5}$-14d	50%	50%	Cimento Portland	2,5%	14
LD:RC$_{2,5}$-21d	50%	50%	Cimento Portland	2,5%	21
LD:RC$_{2,5}$-28d	50%	50%	Cimento Portland	2,5%	28
LD:RC$_{5,0}$	50%	50%	Cimento Portland	5,0%	0
LD:RC$_{5,0}$-7d	50%	50%	Cimento Portland	5,0%	7
LD:RC$_{5,0}$-14d	50%	50%	Cimento Portland	5,0%	14
LD:RC$_{5,0}$-21d	50%	50%	Cimento Portland	5,0%	21
LD:RC$_{5,0}$-28d	50%	50%	Cimento Portland	5,0%	28

*Percentual proporcional à massa final de lodo e rocha.

3.4. CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS

O lodo de esgoto adquirido da ETE-Franca foi previamente distribuído em bandejas de aço inoxidável (30 × 75 cm) e submetido à secagem em estufa de circulação de ar a 60 °C por 72 horas. Após a secagem, o lodo foi triturado em moinho de jarro (MA500) a 120 rpm por 1 hora, visando obter um pó homogêneo. A quantificação de nitrogênio total (N-total) e de carbono total (C-total) foi realizada por meio de análise elementar, utilizando o equipamento CHNS/O 2400 Série II (PerkinElmer, Brasil). Para isso, 10 mg do lodo seco e moído foram pesados em cápsulas de estanho e submetidos ao procedimento analítico, de modo que os resultados foram expressos em porcentagem na base seca.

Para a determinação de fósforo total (P-total) e de metais, procedeu-se à digestão ácida das amostras, utilizando uma combinação de ácido nítrico (HNO_3) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Massas de 1000 mg de lodo seco foram adicionadas a tubos de ensaio contendo 10 mL de HNO_3 concentrado. Os tubos foram submetidos à digestão em bloco, aquecidos a 150 °C por 6 horas, até a completa liberação dos vapores de NO_2. Após essa etapa, adicionaram-se 3 mL de H_2O_2 para finalizar a oxidação do material, mantendo-se o aquecimento por mais 4 horas. Ao término da digestão, os extratos foram resfriados, transferidos para balões volumétricos de 50 mL e ajustados ao volume com água ultrapura. As soluções resultantes foram filtradas por membranas de 0,45 μm e armazenadas até a leitura instrumental por espectrometria.

A quantificação do fósforo foi realizada por método colorimétrico, baseado na formação do complexo fosfomolibdênio reduzido. Um reagente misto foi preparado a partir de solução de ácido sulfúrico a 25%, molibdato de amônio a 9,5% e tartarato de antimônio e potássio a 3,25%. Também foram preparadas soluções de ácido ascórbico a 7% e de ácido cítrico a 2,2%. Dessa forma, a quantificação foi feita por meio da mistura de 500 μL da amostra obtida pela digestão ácida do lodo com 40 μL da solução de ácido cítrico, 400 μL da solução de ácido ascórbico e 400 μL do reagente misto. Assim, a solução para quantificação foi aquecida a 50 °C por 15 minutos, permitindo determinar a concentração de fósforo por meio do espectrofotômetro UV-VIS (Shimadzu-1601PC) a 880 nm.

Os metais presentes nas matrizes utilizadas na formação de compósitos foram quantificados por meio da Espectroscopia de Absorção Atômica (FAAS). As análises foram feitas em um equipamento PerkinElmer® modelo PinnAcle 900T, com chama composta de ar sintético (10 mL) e acetileno (2,5 mL), assim como comprimentos de onda de 309,27, 285,21, 422,67, 766,49, 213,86, 324,75, 248,33, 279,48, 313,26, 228,80, 217,00, 251,61, 232,00 e 357,87 nm para os elementos catiônicos Al^{3+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^{+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{3+}, Mn^{2+}, Mo^{6+}, Cd^{2+}, Pb^{2+}, Si^{4+}, Ni^{2+} e Cr^{6+}, respectivamente.

A caracterização físico-química do lodo também foi realizada por meio de diferentes técnicas instrumentais, com o objetivo de avaliar sua composição funcional e mineralógica. A caracterização das fases cristalinas foi realizada por difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro Shimadzu LabX-6000, operando a 30 kV e 30 mA. As análises foram obtidas no intervalo de 5° a 70° (2θ), com passo de 0,02°, utilizando radiação Cu Kα (λ = 1,54 Å). Os difratogramas permitiram identificar minerais presentes no lodo, bem como possíveis alterações estruturais decorrentes de tratamentos térmicos ou de interações com outros componentes.

A caracterização microestrutural dos compósitos organominerais foi realizada por microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT), utilizando um equipamento ZEISS Xradia Versa 610 (ZEISS, Alemanha). Essa técnica permitiu a obtenção de imagens tridimensionais não destrutivas da estrutura interna dos materiais, possibilitando a avaliação da distribuição espacial de poros, de heterogeneidades e de regiões de densidades distintas. As análises foram conduzidas empregando tensão de aceleração de 80 kV e corrente de 125 μA. Para cada amostra, foram adquiridas aproximadamente 2.000 radiografias ao longo de uma rotação completa de 360°, com tempos de exposição entre 1,2 e 3,0 s por projeção, conforme as características físicas do material. As imagens foram obtidas com resolução espacial na faixa de 2,7 a 8,0 μm por voxel.

A reconstrução tridimensional dos volumes foi feita com o software XMReconstructor (ZEISS), gerando conjuntos de imagens tomográficas representativos da estrutura interna dos grânulos. Posteriormente, os dados foram processados no software ImageJ (Fiji Distribution) para a definição da região de interesse (ROI) e a remoção do fundo da imagem. Nessa etapa, foram criadas máscaras binárias capazes de distinguir as regiões sólidas e as vazias presentes na estrutura dos compósitos. Após o pré-processamento, os volumes reconstruídos foram importados para o software Avizo 2024.1 (Thermo Fisher Scientific), no qual foram realizadas a segmentação das fases e a quantificação volumétrica da porosidade. A porosidade total foi calculada como a razão entre o volume ocupado pelos poros e o volume total da amostra, expressa em porcentagem. Também, foram obtidas informações referentes à distribuição e ao volume individual dos poros presentes nos materiais, permitindo correlacionar as características microestruturais com as propriedades mecânicas e o potencial comportamento de liberação de nutrientes dos compósitos organominerais.

As propriedades mecânicas dos compósitos produzidos foram determinadas em um analisador de textura TA.XT Plus (*Stable Micro Systems*, Surrey, Reino Unido) com célula de carga de 50 N. Os ensaios uniaxiais avaliaram os diferentes compósitos produzidos, variando-se a concentração de cimento (0%, 2,5% e 5%) e o período de cura (7, 14, 21 e 28 dias). A

resistência mecânica foi quantificada pela força máxima no ponto de pico da curva, desconsiderando-se o declive posterior associado à propagação da fratura do compósito.

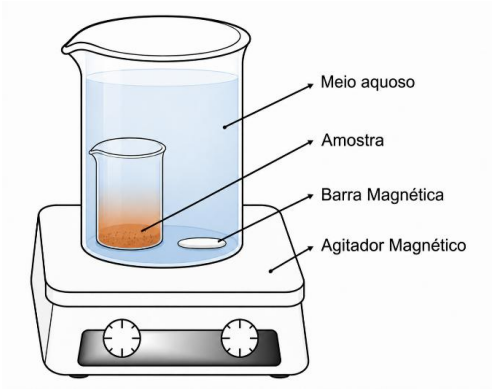
3.5 ENSAIO DE LIBERAÇÃO POR IMERSÃO

A solubilização de fósforo (P) foi investigada em duas condições de liberação: água e solução de ácido cítrico a 2% (m/v). As duas condições de liberação são ensaios recomendados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Assim, o objetivo foi avaliar a liberação do nutriente ao longo do tempo para cada uma das formulações dos compósitos organominerais produzidos, sendo todas as análises realizadas em triplicata.

O ensaio consistiu em adicionar 1,0 g do compósito organomineral a frascos contendo 250 mL de água destilada ou de solução de ácido cítrico a 2%. Os frascos permaneceram sob agitação suave, suficiente apenas para homogeneizar o meio, sem provocar a desintegração mecânica dos materiais. A temperatura foi mantida à 25 °C e os recipientes foram fechados com filme plástico para evitar perdas por evaporação. A Figura 5 apresenta o sistema utilizado nos ensaios de liberação por imersão.

A liberação de nutrientes foi monitorada ao longo do tempo por meio de coletas periódicas. Alíquotas de 1000 µL foram retiradas em intervalos regulares: diariamente até o décimo dia, a cada 48 horas até o vigésimo dia e, posteriormente, a de 5 dias. As alíquotas coletadas foram armazenadas em microtubos adequados, sob refrigeração, até o momento das análises.

Figura 5. Sistema de liberação em meio aquoso, nesse caso, em água ou em solução de ácido cítrico a 2%, utilizando um béquer como meio protetor dos materiais estudados.



A determinação do fósforo solubilizado foi conduzida por método colorimétrico, baseado na formação do complexo fosfomolibdênio reduzido, descrito acima. Os resultados desses ensaios permitiram avaliar a cinética de liberação dos nutrientes, comparando o comportamento das diferentes formulações em água e em ácido cítrico a 2%, além de fornecer subsídios para estimar a eficiência potencial dos compósitos como fontes de fósforo e nitrogênio.

3.6. EXPERIMENTO DE INCUBAÇÃO NO SOLO

A dinâmica de liberação do fósforo disponível a partir dos compósitos foi avaliada por meio de experimento de incubação em solo sob condições controladas. Para o experimento de liberação no solo foi utilizado um Latossolo Vermelho coletado na camada de 30–40 cm em área agrícola no município de São Carlos, SP. O solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado em malha de 2 mm. O solo apresentou as seguintes características: 654 g kg^{-1} de areia, 53 g kg^{-1} de silte e 293 g kg^{-1} de argila; pH (H_2O) 5,0; teores de matéria orgânica e de C total de 14 e 8 g kg^{-1}, respectivamente; capacidade de troca de cátions (CTC) de 44 mmolc kg^{-1}; potássio disponível de 0,5 mmolc kg^{-1} e teor de fósforo de 1,0 mg kg^{-1}.

Amostras de 40 g de solo foram acondicionadas em frascos de polietileno de 50 mL. Cada compósito foi aplicado na dose equivalente a 10 mg de P por unidade experimental, correspondente à razão aproximada de 1:1000 (gP $g_{solo^{-1}}$). O solo foi umedecido a 80% da capacidade de retenção de água, sendo a umidade verificada e corrigida a cada três dias. Os frascos foram mantidos incubados a 25 °C pelos períodos de 3, 7 e 14 dias. Ao final de cada intervalo, o fósforo disponível no solo foi extraído por meio de agitação com 100 mL da solução Mehlich-1, preparada com 0,025 mol L^{-1} de H_2SO_4 e 0,05 mol L^{-1} de HCl. Após agitação por 1 h, as suspensões foram filtradas em papel de filtração lenta, e os extratos foram armazenados sob refrigeração (≈ 5 °C) até a determinação analítica. O teor de P foi quantificado pelo método colorimétrico baseado na formação do complexo fosfomolibdênico reduzido, com leitura em 880 nm em espectrofotômetro UV-Vis, como apresentado na Seção 3.4.

Os resultados obtidos para P foram expressos como porcentagens do nutriente aplicado e representados em função do tempo de incubação. A integração dos dados permitiu comparar a cinética de liberação dos diferentes tratamentos e avaliar a eficiência dos compósitos como fonte de fósforo no solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO INDIVIDUAL DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Inicialmente, as matérias-primas utilizadas na formulação dos compósitos organominerais foram caracterizadas individualmente. A caracterização química por fluorescência de raios X (FRX) e análise elementar (CHN) do lodo de esgoto da estação de tratamento de esgoto de Franca e da rocha fosfática de Registro/SP são apresentadas na Tabela 2. A composição do lodo da ETE-Franca revelou a presença de uma fração orgânica com teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio de 33,30%, 3,48% e 7,01%, respectivamente. Esses valores são compatíveis com a composição esperada de resíduos orgânicos estabilizados provenientes de sistemas municipais de tratamento de esgoto, nos quais a matéria orgânica remanescente constitui uma das principais frações do biossólido (ABREU et al., 2017; BETTIOL, 2015; BALKRISHNA et al., 2025). A presença dessa fração carbonácea torna-se interessante, uma vez que o lodo pode atuar como matriz orgânica na formulação de compósitos fertilizantes organominerais, contribuindo potencialmente para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Além da fração orgânica, o lodo apresentou teor de 9,54% de P_2O_5, indicando a presença de fósforo em sua composição. Esse resultado demonstra que o material contém nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, reforçando seu potencial de aproveitamento agrícola. O nitrogênio presente no lodo pode contribuir diretamente para o valor nutricional da formulação, enquanto o fósforo é um componente estratégico para o desenvolvimento de fertilizantes organominerais voltados à nutrição fosfatada. No entanto, embora o teor de fósforo seja relevante do ponto de vista da reciclagem de nutrientes, sua concentração ainda é limitada em comparação com fontes minerais fosfatadas, o que justifica sua associação a uma fonte complementar de P.

Nesse sentido, a rocha fosfática de Registro/SP apresentou elevados teores de P_2O_5 (25,18%) e de CaO (34,65%). Esses resultados revelam seu potencial de contribuir para o enriquecimento do teor de fósforo dos compósitos organominerais. Além desses constituintes majoritários, a rocha também apresentou teores relevantes de Fe_2O_3 (21,88%), Al_2O_3 (8,26%), SiO_2 (4,74%) e MnO (2,13%), indicando a presença de fases minerais acessórias associadas à matriz fosfática natural. A presença desses óxidos é importante, pois pode influenciar a reatividade da rocha, a disponibilidade de fósforo e a interação desse nutriente com a matriz organomineral formada.

Tabela 2. Quantificação elementar referente ao lodo de esgoto da ETE-Franca e da rocha fosfática de Registro/SP.

Elemento	Média percentual	
	Loto ETE Franca	**Rocha Fosfática**
C	33,30	0,22
H	3,48	0,12
N	7,01	0,20
P_2O_5	9,54	25,18
MgO	0,33	0,13
Al_2O_3	14,33	8,26
SiO_2	7,82	4,74
K_2O	0,70	0,26
CaO	5,35	34,65
Fe_2O_2	8,96	21,88
MnO	0,10	2,13
SO_2	8,64	2,19
ZnO	0,45	0,05
MoO_2	0,00	0,00
Pb	0,00	0,00
Ni	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00
Cd	0,00	0,00
Cu	0,00	0,00

Outro aspecto importante observado na caracterização química do lodo foi a ausência de metais potencialmente tóxicos, como chumbo (Pb), níquel (Ni), cromo (Cr), cádmio (Cd) e cobre (Cu). Esse resultado mostra que, do ponto de vista ambiental, o lodo não apresenta contaminação por elementos nas condições analíticas utilizadas. Assim, considerando a presença de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, associada à ausência de metais potencialmente tóxicos, o lodo proveniente da ETE-Franca apresenta características favoráveis para sua utilização como componente de formulações organominerais. No entanto, é importante notar que o principal potencial do lodo não está necessariamente em seu uso direto como fertilizante fosfatado isolado, mas sim em sua aplicação como matriz orgânica e nutricional em compósitos organominerais.

Dessa forma, a combinação desse resíduo com rocha fosfática permite aumentar a densidade fosfatada do compósito final, visto que a rocha fosfática de Registro/SP apresenta 25,18% de P_2O_5 em sua composição. Nesse sentido, sua associação com rocha fosfática torna-se uma estratégia tecnicamente adequada para aumentar o teor de fósforo na formulação final,

mantendo o caráter organomineral do produto e favorecendo o desenvolvimento de um fertilizante granulado com potencial de liberação gradual de nutrientes.

O cimento Portland, por sua vez, apresentou composição predominantemente cálcica, com teor de 69,25% de CaO, além de SiO_2 (8,49%), SO_3 (8,22%), MgO (3,33%), Fe_2O_3 (2,86%) e Al_2O_3 (2,44%), conforme apresentado na Tabela 3. Essa composição é coerente com sua função no sistema como agente ligante e estabilizante, uma vez que os óxidos de cálcio, silício e alumínio estão diretamente relacionados às reações de hidratação responsáveis pela formação de fases cimentícias. Assim, diferentemente do lodo e da rocha fosfática, cuja função principal está associada ao fornecimento de matéria orgânica e nutrientes, o cimento atua principalmente na estruturação física, favorecendo a coesão das partículas e a integridade dos compósitos durante a cura. Dessa forma, os resultados de caracterização química evidenciam a complementaridade funcional entre os três componentes. O lodo de esgoto contribui com matéria orgânica, nitrogênio e parte do fósforo, enquanto a rocha fosfática atua como fonte mineral responsável pelo enriquecimento fosfatado da formulação, e o cimento Portland desempenha um papel estrutural.

Tabela 3. Quantificação elementar do cimento Portland.

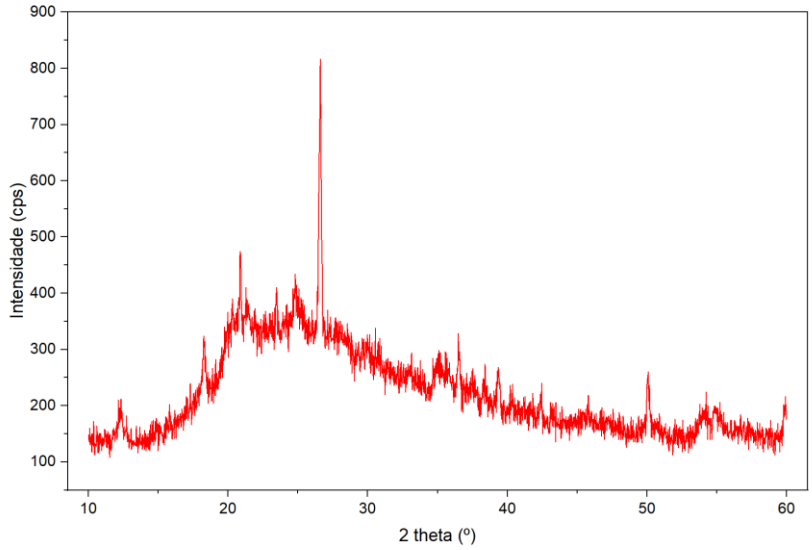
Elemento	Média Percentual (%)	Elemento	Média Percentual (%)
C	3,01	MnO	0,13
H	0,08	SO_3	8,22
N	0,26	ZnO	0,05
P_2O_5	0,86	MoO_3	0,00
MgO	3,33	Pb	0,00
Al_2O_3	2,44	Ni	0,00
SiO_2	8,49	Cr	0,00
K_2O	1,03	Cd	0,00
CaO	69,25	Cu	0,00
Fe_2O_3	2,86		

A Figura 6 apresenta o difratograma de raios X (DRX) do lodo de esgoto, indicando que o resíduo possui matriz predominantemente amorfa ou de baixa cristalinidade, caracterizada pela presença de um halo entre 18 e 35°. Esse comportamento é compatível com a natureza heterogênea de lodos de esgoto, nos quais coexistem matéria orgânica, frações minerais finamente dispersas e compostos inorgânicos pouco ordenados. Além desse halo difuso, observa-se a presença de reflexões cristalinas pontuais, com destaque para o pico intenso em $2\theta = 26,5°$, que pode estar associado a fases silicatadas, como o quartzo, frequentemente

encontrado na forma de areia ou de solo. Outros sinais de menor intensidade ao longo do difratograma indicam a presença de fases minerais secundárias, possivelmente relacionadas a carbonatos, silicatos e óxidos/hidróxidos metálicos.

O padrão de DRX do lodo sugere que o fósforo determinado por análise química não está predominantemente organizado em fases fosfatadas cristalinas bem definidas, como apatita ou outros fosfatos cálcicos altamente cristalinos, pelo menos não em quantidade suficiente para gerar reflexões intensas e facilmente identificáveis. Assim, o fósforo presente no lodo pode estar distribuído em formas menos cristalinas, adsorvido à matéria orgânica, associado a óxidos ou hidróxidos de Fe e Al, ou ainda estar presente em fases minerais pouco ordenadas.

Figura 6. Difratograma de raios X do lodo de esgoto proveniente da ETE-Franca.

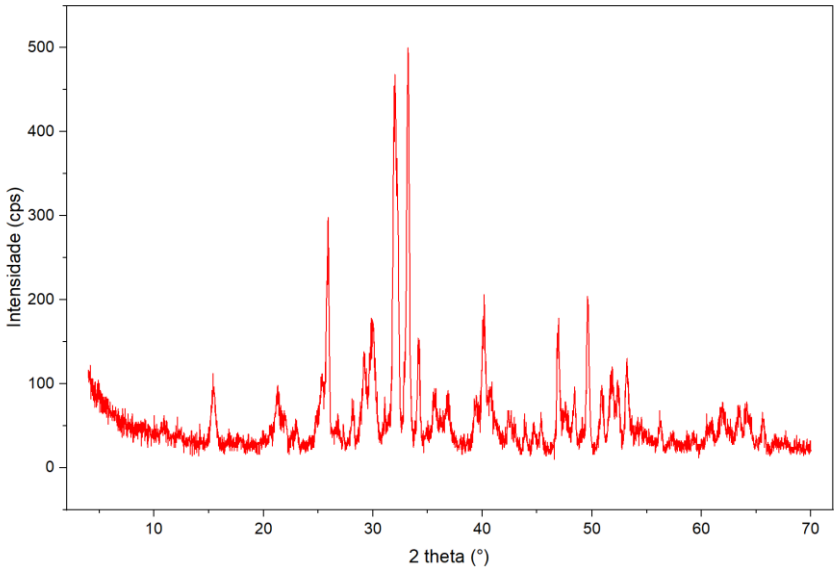


A Figura 7 mostra os padrões de DRX da rocha fosfática, caracterizados por um padrão mais cristalino, com reflexões intensas e bem definidas, especialmente na região entre 30 e 35°. Esse perfil é característico de materiais minerais fosfatados e está associado à presença de fases cálcicas cristalinas que contêm fósforo. As principais fases fosfatadas identificadas nesta rocha foram fluorapatita e hidroxiapatita, enquanto hematita e traços de quartzo também foram observados como fases minerais acessórias. A presença de fluorapatita e hidroxiapatita confirma que o fósforo da rocha está predominantemente associado a fases apatíticas, coerente com o elevado teor de P_2O_5 e CaO observado na caracterização química.

Essa característica é particularmente importante, pois confirma o papel da rocha fosfática de Registro como a principal fonte mineral de fósforo na formulação de compósitos organominerais. Diferentemente do lodo, cujo fósforo parece estar distribuído em formas menos cristalinas ou associado à fração organomineral, a rocha apresenta fósforo estruturado

em fases fosfatadas bem definidas. No entanto, a elevada cristalinidade das fases apatíticas também indica menor solubilidade imediata, característica típica de fosfatos naturais. Assim, a incorporação da rocha à matriz de lodo permite aumentar a densidade fosfatada do material final, ao mesmo tempo em que favorece a obtenção de um fertilizante organomineral com potencial de liberação gradual de fósforo.

Figura 7. Difratograma de raios X da rocha fosfática.

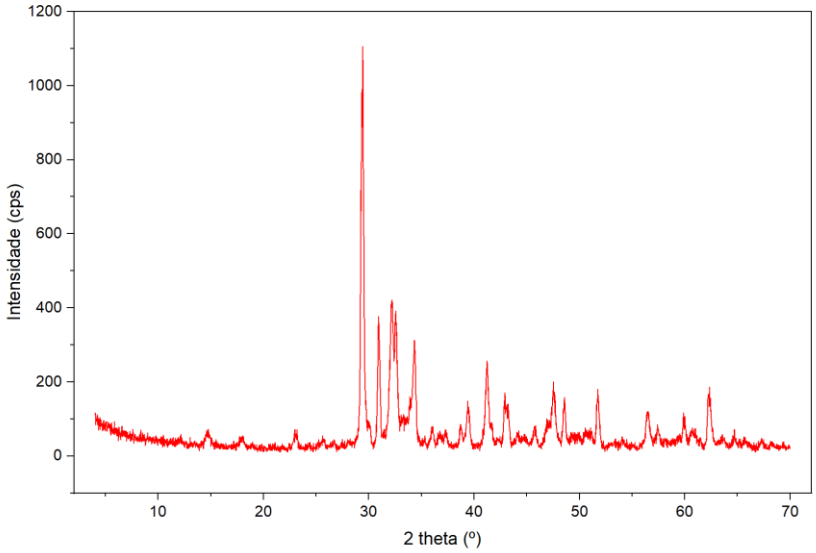


A Figura 8 apresenta o difratograma de raios X para o cimento Portland. O cimento apresentou um perfil difratométrico caracterizado pela presença de reflexões cristalinas intensas, associadas às fases minerais típicas de materiais cimentícios. De modo geral, os sinais observados podem ser atribuídos à presença de compostos cálcicos e silicáticos, como silicatos de cálcio, aluminatos e ferroaluminatos de cálcio, além de fases sulfatadas utilizadas no controle da hidratação do cimento. Esse comportamento é coerente com a composição química do material, caracterizada pelo elevado teor de CaO, associado à presença de SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 e SO_3. Também, a caracterização por DRX do cimento indica sua natureza predominantemente mineral e sua capacidade de atuar como componente estruturante dos compósitos organominerais, visto que durante a etapa de cura em ambiente úmido, as fases presentes no cimento podem reagir com a água, formando produtos hidratados, especialmente silicatos de cálcio hidratados, aluminatos hidratados e hidróxido de cálcio.

Assim, o cimento permite o desenvolvimento de uma matriz cimentícia capaz de promover a coesão entre as partículas de lodo e rocha fosfática, contribuindo para o aumento da integridade física e da resistência mecânica dos compósitos organominerais. Vale destacar que a presença do cimento, como agente ligante na formulação, busca favorecer a formação de

uma estrutura mais consolidada, reduzindo a desagregação dos grânulos durante a secagem e o manuseio.

Figura 8. Difratograma de raios X do cimento Portland.



Com base na caracterização individual das matérias-primas, foram preparados os compósitos organominerais. Todas as formulações foram preparadas pela combinação de lodo de esgoto e rocha fosfática na proporção 1:1, em massa seca, com variação do teor de cimento Portland como agente ligante. Foram avaliadas formulações sem cimento e com adição de 2,5% e 5,0% de cimento, submetidas a diferentes tempos de cura (7, 14, 21 e 28 dias). Essa estratégia experimental permitiu investigar simultaneamente o efeito da incorporação do cimento e da evolução da cura sobre a composição, a estrutura cristalina, a resistência mecânica e a microestrutura dos compósitos organominerais. Dessa forma, os materiais produzidos integram a valorização do lodo de esgoto, o enriquecimento em fosfato pela rocha e a estabilização física promovida pelo cimento.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS ORGANOMINERAIS

As caracterizações químicas dos compósitos produzidos são apresentadas na Tabela 4. Os resultados indicaram alterações significativas na composição dos materiais em função da associação entre lodo de esgoto, rocha fosfática e cimento. Nos grânulos obtidos pela mistura de lodo e rocha fosfática na proporção 1:1, observou-se um aumento substancial no teor de P_2O_5 em relação ao lodo isolado. Enquanto o lodo apresentou teor de 9,54% de P_2O_5, os tratamentos sem cimento apresentaram valores de 17,79%, 19,05%, 16,11% e 19,84% para 7, 14, 21 e 28 dias de cura, respectivamente. Esses resultados demonstram que a associação com a rocha fosfática foi eficiente para elevar o teor de fósforo do material final, transformando o lodo,

inicialmente caracterizado como uma matriz orgânica e nitrogenada com teor moderado de fósforo, em componente de uma formulação organomineral com maior potencial fosfatado.

Também, a presença de cimento alterou a composição relativa dos compósitos organominerais, principalmente nos teores de CaO e P_2O_5. De modo geral, a incorporação de cimento elevou o teor de CaO nas formulações, especialmente nos tratamentos com maior teor de cimento e em tempos de cura mais longos. Aos 28 dias, por exemplo, o tratamento sem cimento apresentou 23,59% de CaO, enquanto os tratamentos com 2,5% e 5,0% de cimento apresentaram 34,62% e 43,17%, respectivamente. Esse aumento está diretamente relacionado ao elevado teor de CaO do cimento Portland e indica maior incorporação de fases cálcicas à matriz dos grânulos. Por outro lado, o aumento da proporção de cimento resultou, em alguns tratamentos, na redução relativa do teor de P_2O_5. Aos 28 dias, o tratamento sem cimento apresentou 19,84% de P_2O_5, enquanto os tratamentos com 2,5% e 5,0% de cimento apresentaram 11,14% e 6,57%, respectivamente. Esse comportamento pode estar associado ao efeito de diluição decorrente da incorporação de cimento, material com baixo teor de P_2O_5, e ao aumento relativo de fases ricas em cálcio na composição final.

Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio nos compósitos foram inferiores aos observados no lodo isolado, em decorrência da mistura com materiais predominantemente inorgânicos, especialmente a rocha fosfática e o cimento. Ainda assim, os compósitos organominerais mantiveram teores relevantes de carbono e nitrogênio, com valores de C variando entre 9,14% e 12,80% e de N entre 1,09% e 2,24%, dependendo da formulação e do tempo de cura. Esse resultado indica que a fração orgânica do lodo permaneceu presente na matriz final, conferindo ao material um caráter organomineral e diferenciando-o de fontes minerais fosfatadas convencionais. De forma geral, os resultados demonstram que a formulação dos compósitos preparados foi eficiente para integrar a fração orgânica e nitrogenada do lodo à fração fosfatada e cálcica da rocha fosfática. E a adição de cimento contribuiu para aumentar o teor de cálcio e, potencialmente, favorecer a estruturação física do material, embora tenha influenciado a composição relativa dos nutrientes, principalmente do fósforo. Dessa maneira, o desempenho das formulações deve ser interpretado com base no equilíbrio entre três fatores principais: teor de P_2O_5, teor de CaO e proporção de cimento.

Tabela 4. Caracterização química das diferentes formulações de compósitos organominerais preparados.

Tempo de cura (dias)	Formulação	C	H	N	P_2O_5	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MnO	SO_3	ZnO	MoO_3
	Lodo	33,30	3,48	7,01	9,54	0,33	14,33	7,82	0,70	5,35	8,96	0,10	8,64	0,45	0,00
-	Rocha Fosfática	0,22	0,12	0,20	25,18	0,13	8,26	4,74	0,26	34,65	21,88	2,13	2,19	0,05	0,00
	Cimento	3,01	0,08	0,26	0,86	3,33	2,44	8,49	1,03	69,25	2,86	0,13	8,22	0,05	0,00
	LD:RC_0	12,80	1,65	2,30	18,45	0,39	11,95	6,28	0,48	20,00	15,42	1,12	5,42	0,25	0,00
0	LD:$RC_{2,5}$	12,80	1,68	2,14	17,97	0,50	10,42	6,33	0,49	21,20	15,11	1,09	4,49	0,23	0,00
	LD:$RC_{5,0}$	12,60	1,61	1,97	16,49	0,97	10,76	6,49	0,55	22,35	14,82	1,07	4,55	0,25	0,00
	LD:RC_0-7d	12,10	1,67	2,24	17,79	0,19	11,38	6,24	0,40	22,41	18,71	1,54	5,12	0,21	0,00
7	LD:$RC_{2,5}$-7d	12,30	1,68	2,18	8,60	1,21	5,42	2,92	0,37	40,80	15,21	3,01	6,14	0,16	0,00
	LD:$RC_{5,0}$-7d	11,50	1,56	1,76	11,40	1,30	9,01	5,88	0,48	33,24	15,88	1,52	6,23	0,23	0,00
	LD:RC_0-14d	11,80	1,68	2,08	19,05	0,23	11,51	5,87	0,43	22,91	18,27	1,35	4,65	0,18	0,00
14	LD:$RC_{2,5}$-14d	11,80	1,64	1,99	17,08	0,50	10,58	6,50	0,44	23,94	17,99	1,20	6,15	0,18	0,00
	LD:$RC_{5,0}$-14d	11,40	1,55	1,71	16,38	0,84	10,66	7,93	0,45	26,04	17,01	1,21	4,66	0,16	0,00
	LD:RC_0-21d	12,10	1,70	2,07	16,11	0,68	9,30	5,11	0,50	21,78	20,53	2,35	7,45	0,33	0,00
21	LD:$RC_{2,5}$-21d	11,00	1,54	1,73	17,86	0,52	11,07	6,71	0,43	24,44	18,52	0,96	5,01	0,22	0,00
	LD:$RC_{5,0}$-21d	9,14	1,17	1,09	12,96	0,86	7,59	6,26	0,49	36,99	16,78	1,35	5,18	0,14	0,00
	LD:RC_0-28d	11,50	1,63	1,96	19,84	0,18	10,82	6,08	0,41	23,59	18,60	1,37	3,83	0,19	0,00
28	LD:$RC_{2,5}$-28d	11,80	1,60	1,89	11,14	0,71	7,35	4,24	0,42	34,62	18,72	2,99	4,27	0,22	0,01
	LD:$RC_{5,0}$-28d	12,80	1,66	2,06	6,57	1,45	4,08	3,08	0,44	43,17	14,77	2,26	7,48	0,17	0,00

Os ensaios no texturômetro foram realizados para avaliar a resistência mecânica das diferentes formulações produzidas. Os resultados de força máxima são apresentados na Tabela 5, na qual se determinou a força necessária para promover a fragmentação dos compósitos após os períodos de cura de 7, 14, 21 e 28 dias. Essa avaliação é importante, pois a resistência mecânica está diretamente relacionada à estabilidade dos compósitos durante as etapas de secagem, manuseio, armazenamento e transporte.

A análise dos resultados indicou que o comportamento mecânico dos compósitos foi influenciado tanto pela presença de cimento quanto pelo tempo de cura. Para o tratamento LD:RC_0, sem adição de cimento, observou-se maior força máxima aos 7 dias (LD:RC_0-7d), de 36,04 N. No entanto, nos tempos posteriores, houve redução da resistência, com valores de 23,67 N, 24,14 N e 20,97 N aos 14, 21 e 28 dias, respectivamente. Esse comportamento sugere que, embora a mistura entre lodo e rocha fosfática tenha apresentado resistência inicial relativamente elevada, a ausência de um agente ligante pode ter limitado a consolidação estrutural dos formulados durante o período de cura.

Por outro lado, nos tratamentos com cimento, observou-se um comportamento distinto. A formulação LD:$RC_{2,5}$ apresentou força máxima de 22,29 N aos 7 dias (LD:$RC_{2,5}$-7d), seguida de valores próximos aos 14 e 21 dias, de 24,48 N e 24,40 N, respectivamente. No entanto, houve um aumento expressivo da resistência aos 28 dias, atingindo 30,46 N (LD:$RC_{2,5}$-28d). Esse resultado indica que a incorporação de 2,5% de cimento contribuiu para o desenvolvimento gradual da resistência mecânica dos compósitos organominerais, possivelmente associado às reações de hidratação e cura do cimento ao longo do tempo.

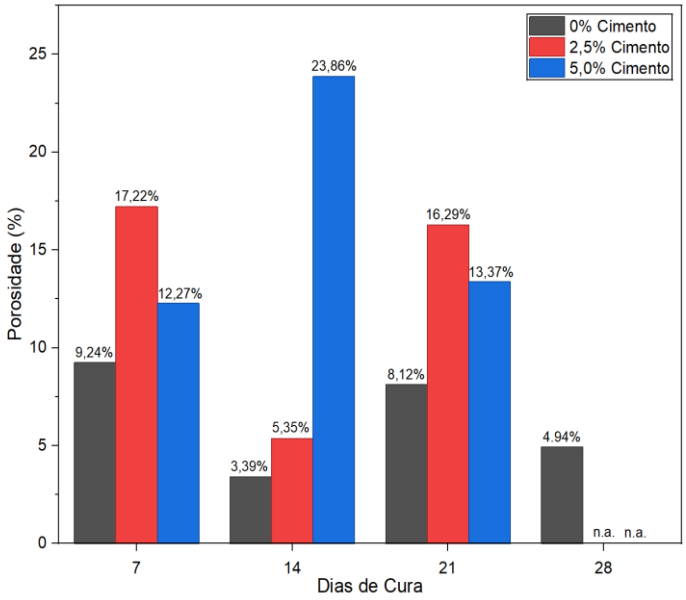
Comportamento semelhante foi observado para a formulação LD:$RC_{5,0}$, que apresentou 30,38 N aos 7 dias, redução intermediária aos 14 e 21 dias, com 25,19 N e 21,97 N, respectivamente, e posterior aumento aos 28 dias, atingindo 32,11 N (LD:$RC_{5,0}$-28d). Esse foi o maior valor observado ao final do período de cura, indicando que a maior proporção de cimento favoreceu a resistência final dos compósitos, cujo efeito pode ser atribuído à maior formação de fases cimentícias hidratadas, capazes de promover maior coesão entre as partículas de lodo e rocha fosfática. De modo geral, os resultados evidenciam que a adição de cimento foi importante para melhorar a estabilidade mecânica dos compósitos formulados ao longo de todo o período de cura. Enquanto o tratamento sem cimento apresentou redução progressiva da força máxima, os tratamentos com cimento apresentaram aumento da resistência aos 28 dias. Isso demonstra que o tempo de cura em ambiente úmido favoreceu a hidratação do cimento e contribuiu para a consolidação da estrutura dos materiais.

Tabela 5. Valores máximos de força (N) aplicados aos diferentes compósitos organominerais preparados.

Formulação	Tempo de cura			
	7 dias	**14 dias**	**21 dias**	**28 dias**
LD:RC_0	36,04	23,67	24,14	20,97
LD:$RC_{2,5}$	22,29	26,48	24,73	30,55
LD:$RC_{5,0}$	30,38	27,18	25,97	29,95

A caracterização por microtomografia de raios X complementou os resultados mecânicos, permitindo a avaliação da estrutura interna dos compósitos organominerais. Essa análise complementa os resultados obtidos pelo texturômetro, pois permite compreender como a organização interna dos compósitos, a formação de vazios e a presença de trincas podem influenciar a resistência mecânica dos materiais. Inicialmente, esperava-se que o aumento do teor de cimento e do tempo de cura reduzisse progressivamente a porosidade, devido à formação de uma matriz cimentícia mais consolidada. No entanto, os resultados obtidos não seguiram um comportamento linear, indicando que a porosidade dos compósitos, apresentada na Figura 9, foi influenciada não apenas pelo teor de cimento e pelo tempo de cura, mas também pela heterogeneidade da mistura, pela umidade inicial do lodo e pelas diferenças de densidade entre as fases orgânica, mineral e cimentícia.

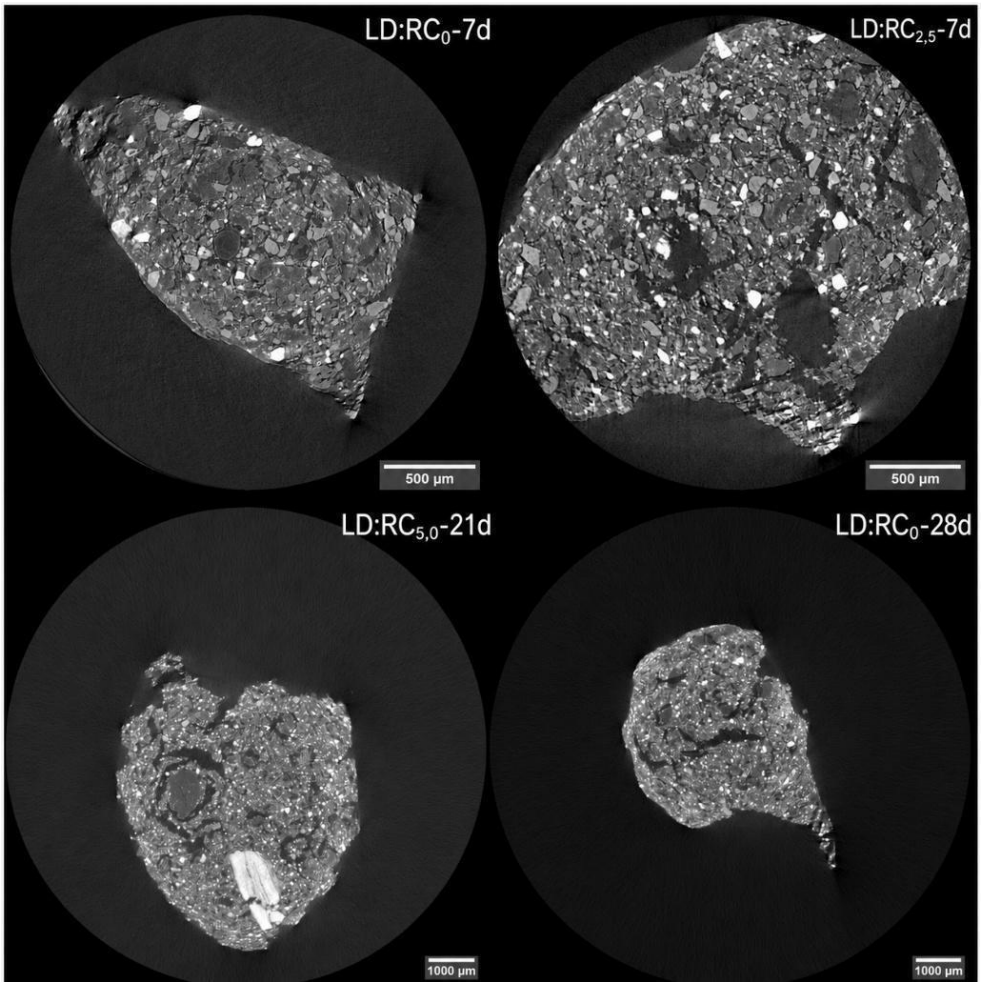
Figura 9. Porosidade dos compósitos organominerais determinada por microtomografia de raios X em função do teor de cimento e do tempo de cura.



Os valores de porosidade dos compósitos variaram de 3,39% a 23,86%, indicando diferenças significativas entre as formulações. Para os materiais sem cimento (LD:RC_0), os valores foram de 9,24% (LD:RC_0-7d), 3,39% (LD:RC_0-14d), 8,12% (LD:RC_0-21d) e 4,94% (LD:RC_0-28d) para 7, 14, 21 e 28 dias de cura, respectivamente. Nos compósitos contendo 2,5% de cimento, os valores foram de 17,22%, 5,35% e 16,29% para 7, 14 e 21 dias, respectivamente, não sendo possível obter resultado para 28 dias. Já para os compósitos contendo 5,0% de cimento, foram observados valores de 12,27%, 23,86% e 13,37% para 7, 14 e 21 dias, respectivamente, também sem resultado para 28 dias. Esses dados mostram que a maior adição de cimento não resultou necessariamente em menor porosidade, contrariando a tendência inicialmente esperada. Vale destacar que os compósitos com tempos de cura mais longos e maiores proporções de cimento não puderam ser analisados, pois se tornaram extremamente secos e frágeis durante o preparo, fragmentando-se no manuseio.

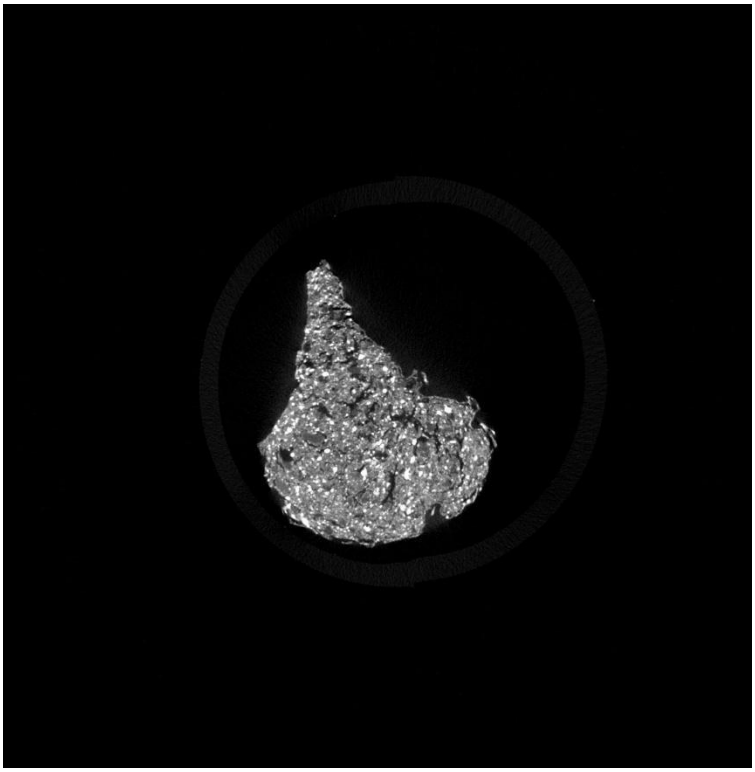
Essa ausência de tendência linear pode estar relacionada à própria complexidade da matriz formada. O lodo utilizado apresenta natureza heterogênea, com fração orgânica, umidade residual e regiões de densidade variável. Durante a cura e a posterior secagem, a perda de água pode provocar retração da fração orgânica e a expansão de vazios previamente existentes. Além disso, a presença de partículas minerais mais densas, provenientes da rocha fosfática e do cimento, pode gerar regiões de interface mais frágeis, favorecendo a formação de trincas ao redor dessas fases. Dessa forma, a microtomografia sugere que a porosidade dos compósitos não se limita a vazios isolados, mas também inclui estruturas conectadas, fissuras e macroporos formados pela coalescência de poros menores. As seções bidimensionais obtidas por microtomografia são apresentadas na Figura 10 e permitem visualizar a heterogeneidade interna dos compósitos, evidenciando a distribuição de fases minerais mais densas, a presença de vazios e a formação de trincas na matriz organomineral.

Figura 10. Seções bidimensionais obtidas por microtomografia de raios X dos compósitos organominerais LD:RC_0-7d, LD:$RC_{2,5}$-7d, LD:$RC_{5,0}$-21d e LD:RC_0-28d, evidenciando a heterogeneidade interna da matriz, a presença de partículas minerais de maior densidade e a ocorrência de poros e trincas.



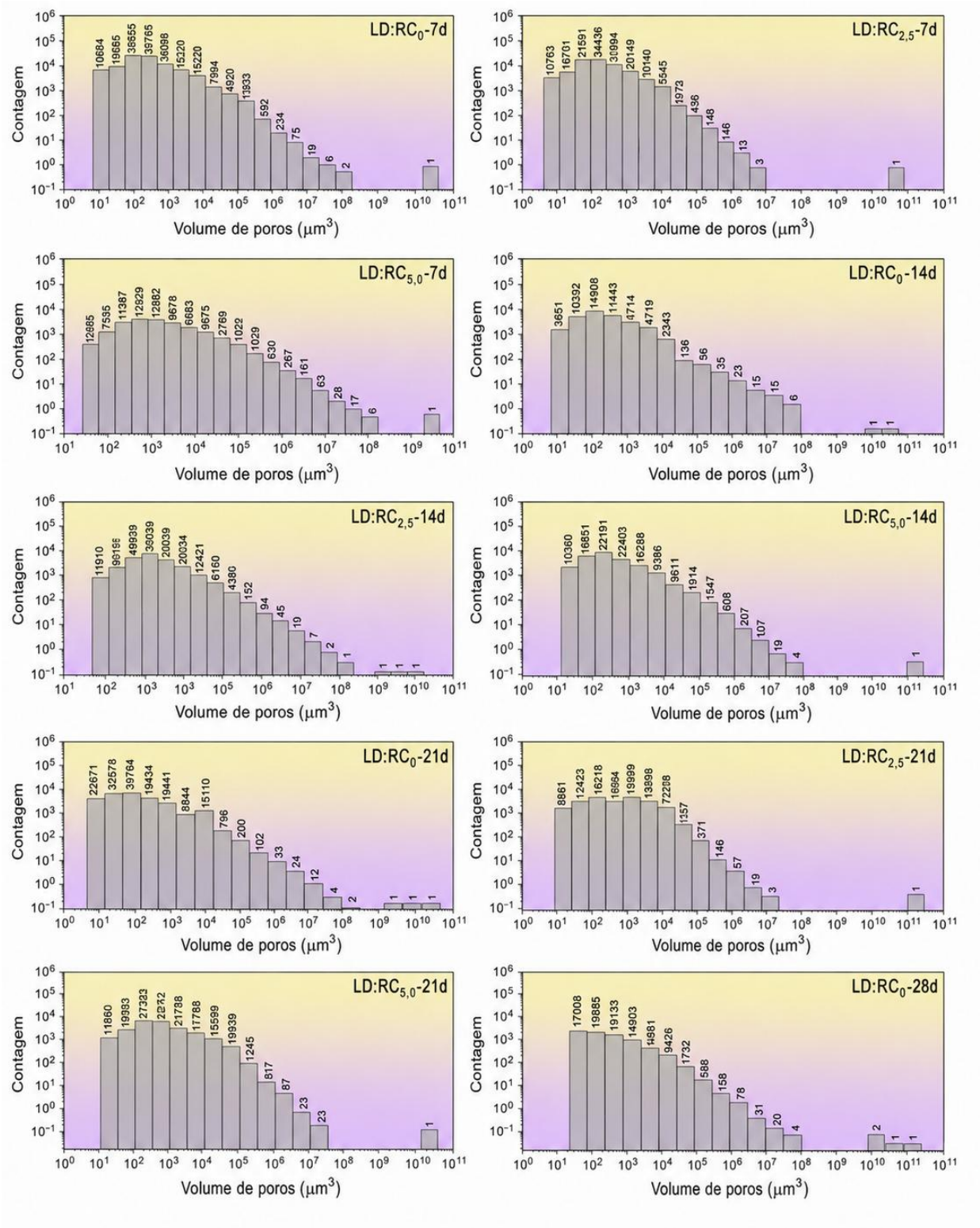
Essa interpretação é reforçada pelas imagens de microtomografia, nas quais se observa a presença de regiões mais densas distribuídas na matriz, associadas às partículas minerais, além de trincas e vazios internos. As trincas aparecem preferencialmente nas periferias das fases mais densas, sugerindo fragilidade nas interfaces entre lodo, rocha fosfática e cimento. Esse comportamento pode estar relacionado à desidratação dos poros globulares naturais, à expansão de fendas já existentes e à conexão entre estruturas porosas, formando canais maiores ou macroporos. Essa característica é relevante, pois pode influenciar tanto a resistência mecânica quanto a liberação de nutrientes, uma vez que poros e trincas conectados favorecem a entrada de água no interior do compósito e a difusão dos nutrientes para o meio externo, como mostra a Figura 11.

Figura 11. Representação das trincas e macroporos observados nos compósitos organominerais por microtomografia de raios X, com destaque para a concentração de fissuras nas interfaces entre fases mais densas, atribuídas à rocha fosfática e ao cimento, e a matriz organomineral. A imagem corresponde ao LD:$RC_{5,0}$-7d.



A análise dos histogramas de volume de poros, apresentados na Figura 12, também indicou que todos os compósitos organominerais avaliados apresentaram pelo menos um poro com volume significativamente superior aos demais, sugerindo a formação de macroporos a partir da união de poros menores ao longo da matriz. Esse resultado é importante porque demonstra que a porosidade dos compósitos não deve ser interpretada apenas em termos de percentual total, mas também quanto à distribuição e conectividade dos poros. Assim, compósitos com percentuais de porosidade semelhantes podem apresentar comportamentos distintos de resistência, dependendo da presença de trincas, macroporos e canais conectados.

Figura 12. Histogramas de distribuição de volume de poros obtidos por microtomografia de raios X para os compósitos organominerais: (a) LD:RC_0-7d, (b) LD:$RC_{2,5}$-7d, (c) LD:$RC_{5,0}$-7d, (d) LD:RC_0-14d, (e) LD:$RC_{2,5}$-14d, (f) LD:$RC_{5,0}$-14d, (g) LD:RC_0-21d, (h) LD:$RC_{2,5}$-21d, (i) LD:$RC_{5,0}$-21d e (j) LD:RC_0-28d.



Quando os resultados de microtomografia são analisados em conjunto com os dados de texturômetro, observa-se que a resistência mecânica dos compósitos não depende exclusivamente do percentual total de poros. Por exemplo, a formulação com 5,0% de cimento e 14 dias de cura apresentou a maior porosidade entre as amostras analisadas, com 23,86%, mas não correspondeu à menor resistência mecânica entre todos os tratamentos. Isso sugere que a integridade estrutural do compósito depende de um equilíbrio entre a presença de poros, a conectividade entre eles, a distribuição das fases minerais e a capacidade do cimento de formar uma matriz ligante. Por outro lado, o aumento da resistência observado nos compósitos com cimento aos 28 dias, especialmente para a formulação com 5,0% de cimento, indica que a cura contribuiu para a consolidação estrutural do material, ainda que essa consolidação não tenha resultado, necessariamente, em redução linear da porosidade.

Dessa forma, a microtomografia contribui para compreender que os compósitos organominerais são sistemas estruturalmente heterogêneos, nos quais coexistem partículas minerais densas, fração orgânica menos densa, vazios internos, trincas e regiões cimentícias. Essa heterogeneidade é inerente à composição e pode ser considerada parte da funcionalidade do compósito, desde que mantido um equilíbrio adequado entre resistência mecânica e permeabilidade. Em fertilizantes organominerais de liberação gradual, uma estrutura completamente compacta poderia dificultar a penetração de água e retardar excessivamente a liberação de nutrientes, enquanto uma estrutura demasiadamente porosa ou fissurada poderia favorecer desagregação mecânica e liberação rápida. Assim, os resultados indicam que a escolha da formulação mais adequada deve considerar simultaneamente a composição química, a resistência mecânica e a microestrutura interna.

Com base na integração entre caracterização química, resistência mecânica e microtomografia, os compósitos contendo 0% (controle) e 5% de cimento, com tempos de cura de 14 e 28 dias, foram selecionados para caracterizações complementares. A escolha do teor de 5,0% de cimento justifica-se pelo melhor desempenho mecânico observado ao final da cura, enquanto os tempos de 14 e 28 dias representam, respectivamente, uma condição intermediária e outra mais avançada de desenvolvimento das reações de hidratação do cimento. Além disso, esses tratamentos permitem avaliar se o aumento do tempo de cura modifica a estrutura cristalina e o comportamento de liberação dos nutrientes.

A Figura 13 apresenta os difratogramas de raios X dos diferentes compósitos organominerais selecionados, visando verificar a permanência das fases cristalinas características da rocha fosfática e do cimento após o processamento, bem como compreender a contribuição da fração menos cristalina do lodo na matriz final. Nos compósitos LD:RC_0,

observa-se que os difratogramas apresentam uma combinação das características do lodo e da rocha fosfática. As formulações mantiveram reflexões associadas às fases minerais fosfatadas, principalmente na região entre 30 e 35°, indicando que a rocha fosfática permaneceu presente na matriz após o processamento e os períodos de incubação. Ao mesmo tempo, a presença de uma linha de base menos definida evidencia a contribuição da fração orgânica e amorfa do lodo. Esse comportamento indica a formação de uma matriz organomineral, na qual fases minerais cristalinas coexistem com componentes orgânicos e inorgânicos de menor ordenamento estrutural.

A comparação entre os tratamentos sem cimento e com adição de cimento indica que a incorporação do agente ligante não promoveu o desaparecimento das principais reflexões atribuídas à rocha fosfática. Isso sugere que a etapa de cura não degradou e nem transformou completamente as fases cristalinas fosfatadas presentes no compósito organomineral. No entanto, pequenas alterações na intensidade relativa dos picos podem ser observadas, o que pode estar relacionado ao efeito de diluição da fase fosfatada pela adição do cimento, à formação de fases hidratadas pouco cristalinas e à maior contribuição de compostos cálcicos provenientes do cimento Portland.

Em relação ao tempo de incubação, os difratogramas dos materiais curados por 14 e 28 dias indicam a manutenção das principais fases cristalinas, sem surgimento de alterações estruturais significativas. Esse resultado sugere que o processo de incubação em ambiente úmido favoreceu principalmente a consolidação física dos grânulos, por hidratação do cimento, mas sem promover mudanças cristalográficas expressivas nas fases fosfatadas da rocha. Cabe destacar que alguns produtos hidratados do cimento, como silicatos de cálcio hidratados, podem apresentar baixa cristalinidade ou sinais pouco definidos, o que limita sua identificação direta por DRX. Dessa forma, a cura parece atuar mais diretamente sobre a resistência e a coesão do material do que sobre a transformação mineralógica da fonte fosfatada.

Esses resultados são importantes quando associados à caracterização química e aos ensaios mecânicos. A análise química demonstrou que a incorporação da rocha fosfática elevou o teor de P_2O_5 dos grânulos, enquanto a DRX confirmou a presença de fases fosfatadas cristalinas na matriz. Por outro lado, a adição de cimento aumentou o teor de CaO e contribuiu para a formação de uma matriz com maior potencial de consolidação estrutural, especialmente após os períodos de cura. Assim, a formulação obtida apresenta uma estrutura compatível com a proposta de fertilizante organomineral, combinando fração orgânica e nitrogenada do lodo, fases fosfatadas minerais da rocha e componentes cimentícios responsáveis pela estabilidade física. Para facilitar a compreensão do experimento e dos resultados obtidos, a Figura 14

apresenta um modelo da estrutura interna dos compósitos organominerais, destacando a atuação do lodo como matriz orgânica, da rocha fosfática como fase mineral, e do cimento como agente estruturante.

Figura 13. Difratograma de raios X dos compósitos organominerais contendo 0 e 5% de cimento, com tempos de cura de 0, 14 e 28 dias.

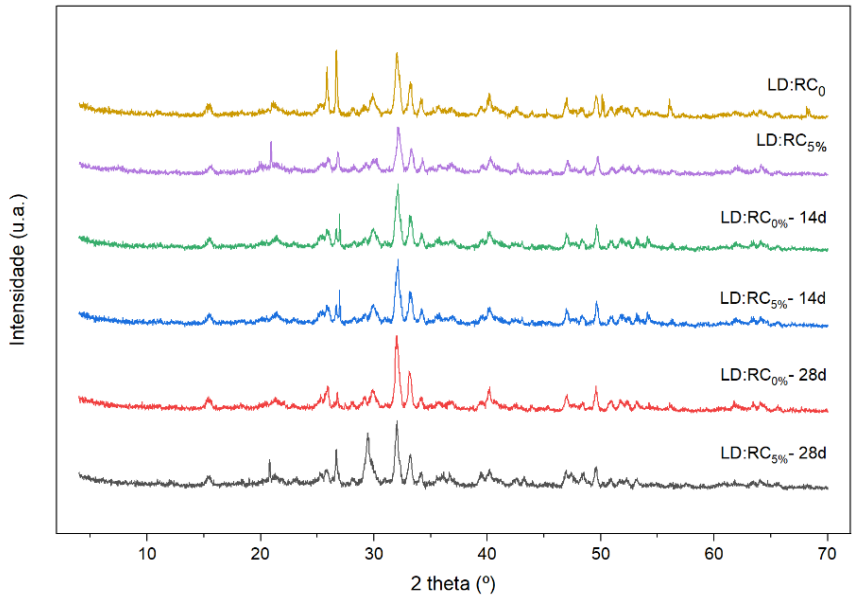
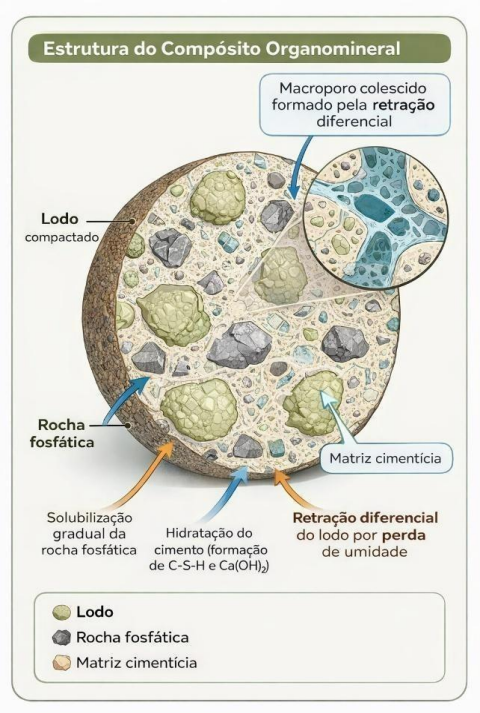


Figura 14. Modelo conceitual da estrutura interna dos compósitos organominerais preparados a partir de lodo de esgoto, rocha fosfática e cimento Portland.

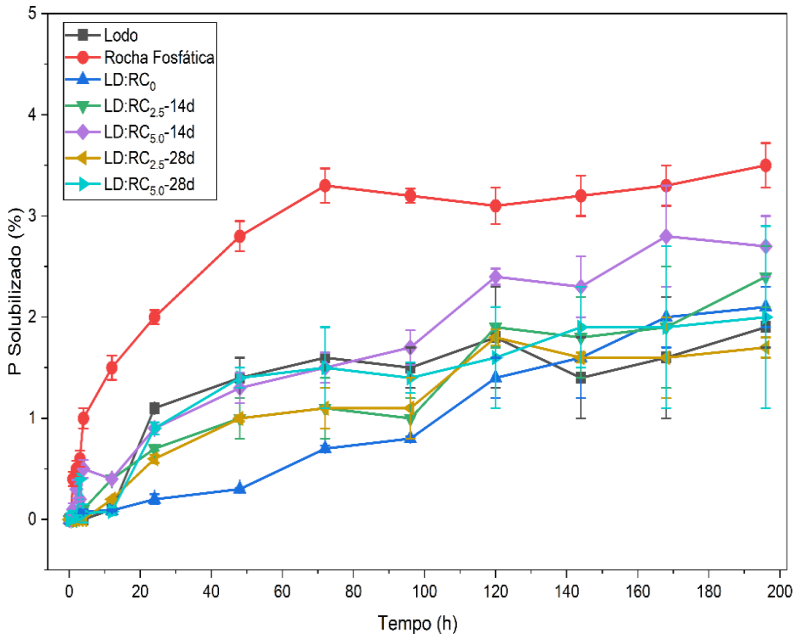


4.3. ENSAIOS DE LIBERAÇÃO

A partir dos resultados obtidos por texturômetro e microtomografia, os compósitos organominerais contendo 0% (controle), 2,5% e 5% de cimento, com tempos de cura de 0, 14 e 28 dias, foram avaliados quanto ao perfil preliminar de liberação de fósforo em meio aquoso. A Figura 15 apresenta as curvas médias de liberação de fósforo (P) em água.

Os perfis de liberação de fósforo em água mostraram baixa solubilização do nutriente para todos os materiais, com valores inferiores a 4% do fósforo total aplicado. Esse comportamento é coerente com a natureza das fontes avaliadas, uma vez que tanto o lodo de esgoto quanto a rocha fosfática apresentam frações de fósforo pouco solúveis em água. Nesse contexto, a rocha fosfática isolada apresentou a maior liberação relativa ao final do ensaio, atingindo 3,5%. Embora rochas fosfáticas sejam caracteristicamente materiais de baixa solubilidade em água, a utilização da rocha na forma particulada aumenta a área superficial exposta ao meio, favorecendo a dissolução superficial e a dessorção de espécies fosfatadas mais lábeis. Assim, a maior liberação observada para a rocha não deve ser interpretada como alta solubilidade do material, mas como resultado da maior exposição direta das partículas minerais ao meio aquoso.

Figura 15. Liberação acumulada de fósforo em meio aquoso a partir do lodo de esgoto, da rocha fosfática e dos compósitos organominerais preparados com 2,5 e 5,0% de cimento, sem cura e após 14 e 28 dias de cura. As barras verticais representam o desvio padrão.



Por outro lado, o lodo de esgoto isolado apresentou comportamento distinto, com liberação entre 1,5 a 1,9%. Esse perfil indica que apenas uma pequena fração do fósforo presente no lodo está prontamente disponível para solubilização em água. Esse resultado é compatível com a natureza química do biossólido, no qual o fósforo pode estar associado à matéria orgânica, adsorvido em óxidos e hidróxidos de Fe e Al ou precipitado em formas minerais pouco solúveis. Dessa forma, embora o lodo apresente valor agronômico pela presença conjunta de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, a liberação de P na água é limitada, o que reforça a necessidade de associá-lo a uma fonte fosfatada complementar para aumentar a densidade nutricional do material final.

A incorporação do cimento e o tempo de cura modificaram o comportamento de liberação dos compósitos em comparação aos materiais puros. Nos compósitos sem cura, a liberação de fósforo permaneceu em faixa intermediária, indicando que a simples mistura entre lodo, rocha e cimento já altera a exposição das fases fosfatadas ao meio aquoso. Nessa condição, a matriz ainda não passou pelo processo de consolidação promovido pela hidratação do cimento, o que pode favorecer maior contato inicial entre a água e as partículas de rocha fosfática presentes no interior do compósito. No entanto, a liberação permaneceu baixa em termos absolutos, mostrando que o fósforo incorporado à matriz organomineral não foi rapidamente lixiviado pela água.

Para os compósitos submetidos a 14 dias de cura, observou-se um aumento gradual da liberação em função do teor de cimento. O tratamento LD:$RC_{2,5}$-14d apresentou perfil crescente e atingiu valores próximos de 2,42% em 197 horas, superando o lodo isolado após 100 h. O tratamento LD:$RC_{5,0}$-14d apresentou comportamento semelhante, porém com menor intensidade, atingindo valor de 2,71%. Esse resultado sugere que, em uma condição intermediária de cura, a hidratação parcial do cimento pode contribuir para modificar a organização da matriz, sem, ainda, promover uma barreira difusional suficientemente consolidada para restringir a entrada de água. Além disso, a elevada porosidade observada para o compósito LD:$RC_{5,0}$-14d pode ter favorecido a permeação do meio aquoso no interior do material, ampliando a área de contato entre a água e as fases fosfatadas. Por outro lado, os compósitos com 28 dias de cura resultaram em maior controle da liberação de fósforo. Os compósitos LD:$RC_{5,0}$-28d e LD:RC_{0}-28d apresentaram menores percentuais de liberação em 200 h, entre 1,7 e 2,0%. Esse comportamento indica que a evolução das reações de hidratação do cimento favoreceu a formação de uma matriz mais consolidada, capaz de restringir a difusão da água e a solubilização do fósforo. Esse resultado é coerente com os dados de resistência mecânica, nos quais os compósitos com cimento apresentaram aumento de resistência aos 28

dias, e também com a interpretação microestrutural, que aponta a importância da conectividade dos poros e das interfaces entre as fases para o transporte do nutriente.

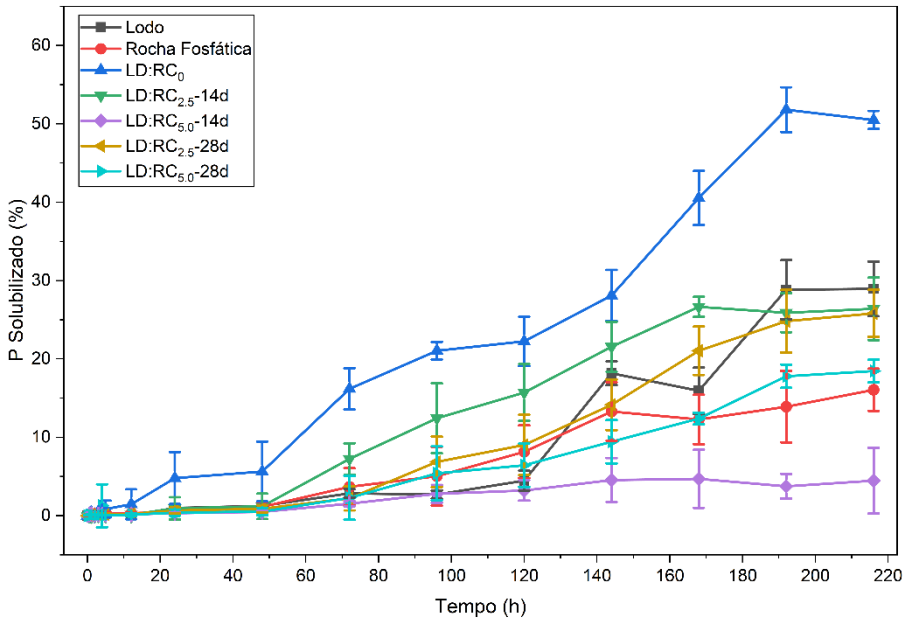
De modo geral, a liberação de fósforo em água foi controlada por dois fatores principais: a natureza química das fontes fosfatadas e a estrutura física dos compósitos. A rocha fosfática apresentou maior liberação relativa por estar diretamente exposta ao meio, enquanto o lodo apresentou menor liberação devido à associação do fósforo a formas menos lábeis. Nos compósitos, a matriz formada pela interação entre lodo, rocha e cimento atuou como uma barreira física parcial, modulando a entrada de água e a difusão do fósforo. Assim, os resultados indicam que o cimento não atua apenas como agente ligante, mas também como componente capaz de alterar o caminho de difusão do nutriente, especialmente após o período completo de cura.

A Figura 16 apresenta os resultados de liberação de fósforo em solução de ácido cítrico a 2%. Diferentemente do ensaio conduzido em água, no qual todos os tratamentos apresentaram baixa solubilização de fósforo, o meio ácido promoveu um aumento expressivo na fração de P solubilizada. Esse comportamento se deve ao fato da solução de ácido cítrico atuar como meio extrator ácido e complexante, favorecendo a dissolução de fases fosfatadas pouco solúveis e a mobilização de fósforo associado a cálcio, ferro e alumínio. Dessa forma, o ensaio em ácido cítrico permite avaliar uma fração potencialmente mais disponível do fósforo presente nos materiais, especialmente em comparação ao ensaio em água, que expressa apenas a fração prontamente solúvel.

Nesse contexto, os perfis de liberação em ácido cítrico apresentaram comportamento crescente ao longo do tempo, com diferenças entre os materiais puros e os compósitos organominerais. A rocha fosfática isolada apresentou liberação relativamente baixa, atingindo 16,06% em 216 horas. Embora a rocha apresente elevado teor de P_2O_5 e fases apatíticas cristalinas, como discutido anteriormente por DRX, sua solubilização permaneceu limitada mesmo em meio ácido. Esse comportamento reforça a baixa reatividade agronômica característica de fosfatos naturais mais cristalinos, nos quais uma parte significativa do fósforo encontra-se estruturalmente organizada em fases de menor solubilidade imediata. Por outro lado, o lodo de esgoto isolado apresentou liberação superior à da rocha fosfática, atingindo 28,94% de P solubilizado em 216 horas. Isso mostra que, embora o fósforo presente no lodo tenha apresentado baixa liberação em água, uma fração considerável pode ser mobilizada em meio ácido. Esse comportamento também sugere que o P do lodo não está apenas em formas prontamente solúveis, mas pode estar associado à matéria orgânica, a óxidos e hidróxidos metálicos ou a fases inorgânicas menos cristalinas, passíveis de solubilização em condições

ácidas e complexantes. Assim, o lodo atua não apenas como matriz orgânica e fonte de nitrogênio, mas também como fonte complementar de fósforo potencialmente mobilizável sob condições químicas favoráveis.

Figura 16. Liberação acumulada de fósforo em solução de ácido cítrico a 2% para o lodo de esgoto, a rocha fosfática e os compósitos organominerais preparados com 2,5 e 5,0% de cimento, sem cura e após 14 e 28 dias de cura. As barras verticais representam o desvio padrão.



Entre os compósitos organominerais, o LD:RC_0 apresentou o maior percentual de liberação em ácido cítrico, atingindo 50,50% em 9 dias. Esse resultado revela que a associação entre lodo e rocha fosfática, mesmo sem adição de cimento, favoreceu a solubilização do fósforo em comparação com os materiais isolados. Além disso, a ausência de cimento evita a formação de uma matriz cimentícia mais consolidada, permitindo maior acesso da solução extratora às partículas fosfatadas presentes no interior do compósito. Já a comparação entre os compósitos com cimento mostrou que o teor de aditivo e o tempo de cura exerceram forte influência na liberação de fósforo. Para os tratamentos curados por 14 dias, o compósito LD:$RC_{2,5\%}$-14d apresentou liberação crescente, atingindo 26,41%. Esse comportamento indica que a adição moderada de cimento não impediu a ação da solução ácida sobre a matriz organomineral, o que permitiu a solubilização de fósforo. Nesse caso, a estrutura formada após 14 dias de cura parece ainda manter porosidade e conectividade suficientes para permitir a penetração da solução de ácido cítrico e o contato com as fases fosfatadas.

Por outro lado, o compósito LD:$RC_{5,0\%}$-14d apresentou a menor liberação entre os materiais avaliados, permanecendo próxima de 4,47%. Esse comportamento sugere que a maior

proporção de cimento pode ter promovido uma retenção mais efetiva do fósforo e/ou dificultado o acesso do meio extrator às fases fosfatadas. Além do efeito físico associado à formação de uma matriz mais coesa, também é possível considerar que a maior disponibilidade de cálcio proveniente do cimento favoreça a formação ou estabilização de espécies fosfatadas cálcicas de menor solubilidade. Assim, o tratamento LD:$RC_{5,0\%}$-14d indica que o aumento do teor de cimento pode reduzir a solubilização do fósforo quando a matriz cimentícia ainda se encontra na fase intermediária de consolidação.

Nos compósitos com 28 dias de cura, os tratamentos LD:$RC_{2,5\%}$-28d e LD:$RC_{5,0\%}$-28d apresentaram comportamento intermediário. O LD:$RC_{2,5\%}$-28d atingiu 25,82%, enquanto o LD:$RC_{5,0\%}$-28d apresentou liberação próxima de 18,46% após 216 horas. Esses resultados indicam que o avanço da cura não impediu completamente a extração do fósforo pelo ácido cítrico, mas modulou a intensidade da liberação em função do teor de cimento. A formulação com 2,5% de cimento manteve maior capacidade de solubilização, aproximando-se do comportamento do lodo isolado, enquanto a formulação com 5,0% apresentou maior controle da liberação. Esse efeito pode estar associado ao desenvolvimento mais avançado das reações de hidratação do cimento, com a formação de uma matriz mais consolidada e maior presença de fases cálcicas, capazes de restringir parcialmente a difusão e a solubilização do fósforo.

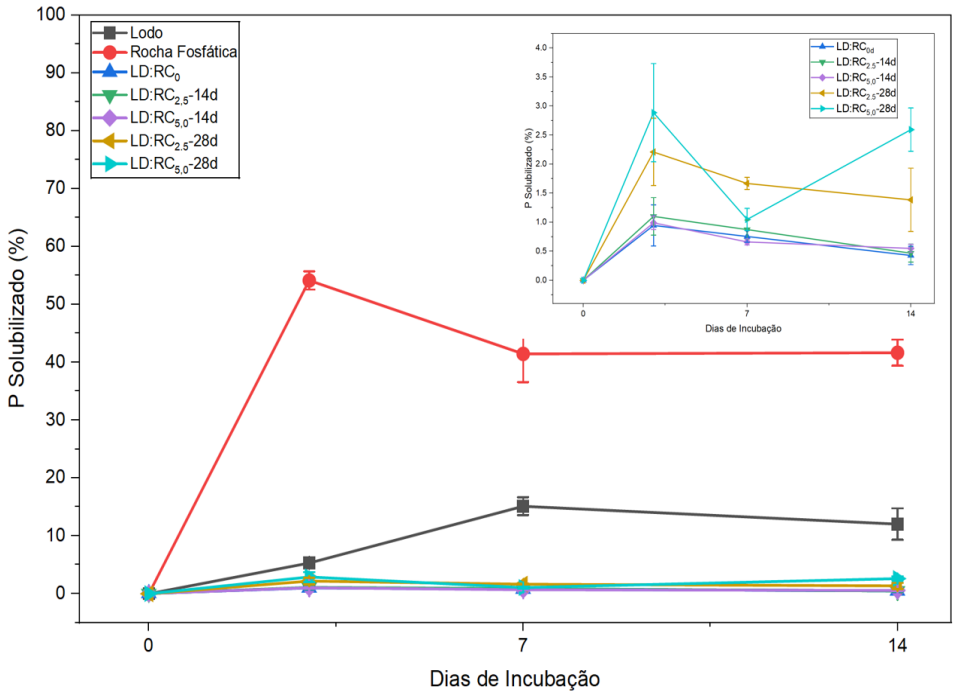
Vale destacar que quando os resultados em ácido cítrico (Figura 16) são comparados aos obtidos em água (Figura 15), observa-se que o meio extrator modificou substancialmente a ordem de liberação dos tratamentos. Em água, a rocha fosfática apresentou a maior liberação relativa, embora em valores absolutos baixos, enquanto, em ácido cítrico, o compósito LD:RC_0 passou a apresentar o maior percentual de P solubilizado. Esse contraste evidencia que a liberação de fósforo dos compósitos não depende apenas do teor total de P_2O_5, mas também da interação entre composição química, forma física, microestrutura e condição do meio extrator. Em meio aquoso, prevalecem processos de dissolução superficial e difusão limitada, enquanto, em ácido cítrico, por outro lado, a acidificação e a complexação favorecem a mobilização de formas menos solúveis de fósforo, especialmente aquelas associadas a cálcio, ferro e alumínio.

De maneira geral, os resultados indicam que os compósitos organominerais apresentam uma fração significativa de fósforo potencialmente solubilizável em meio ácido, o que reforça seu potencial como fonte fosfatada de liberação gradual. O tratamento LD:RC_0 apresentou maior solubilização em ácido cítrico, indicando que a combinação entre lodo e rocha fosfática favorece a mobilização do P. No entanto, a presença de cimento permitiu modular esse comportamento, reduzindo a liberação em determinadas formulações e demonstrando que o aditivo atua não apenas como agente estruturante, mas também como componente capaz de

alterar a disponibilidade do fósforo. Assim, os resultados sugerem que o equilíbrio entre o teor de cimento e o tempo de cura é determinante para ajustar simultaneamente a resistência mecânica, a estabilidade estrutural e a liberação de fósforo dos compósitos organominerais.

Os ensaios de liberação de fósforo em solo apresentados na Figura 17 indicam um panorama semelhante ao observado na liberação em água, principalmente quanto à solubilidade do P lábil e à sua potencial assimilação em sistemas de cultivo após 14 dias de incubação. De maneira geral, foram observadas diferenças entre o lodo de esgoto e a rocha fosfática, utilizados na forma de pó, e os compósitos organominerais, aplicados na forma de grânulos. A rocha fosfática apresentou os maiores percentuais de P disponível durante o período avaliado, atingindo aproximadamente 54% no primeiro período de incubação e permanecendo em torno de 40% aos 7 e 14 dias. O lodo de esgoto apresentou comportamento intermediário, com aumento da disponibilidade de P até os 7 dias, quando atingiu aproximadamente 15. Em contraste, os compósitos organominerais apresentaram valores inferiores a 3% nos primeiros 14 dias de incubação.

Figura 17. Ensaio de liberação de fósforo em solo após 14 dias de incubação com lodo de esgoto, rocha fosfática e compósitos organominerais preparados com 2,5 e 5,0% de cimento, sem cura e após 14 e 28 dias de cura. As barras verticais representam o desvio padrão.



Um aspecto importante para compreender essas diferenças diz respeito à forma física adotada no experimento. O lodo de esgoto e a rocha fosfática foram incorporados ao solo na forma de pó, proporcionando maior área superficial de contato entre as partículas e o ambiente do solo. Além disso, por se tratarem de materiais pulverulentos, essas fontes permanecem incorporadas à matriz do solo ao longo de todo o período experimental. Por outro lado, os compósitos organominerais foram aplicados na forma de grânulos e retirados do solo ao final de cada período de incubação antes da determinação do fósforo disponível. Dessa forma, para os tratamentos granulados, os valores obtidos representam predominantemente a fração de P efetivamente solubilizada a partir do grânulo e transferida para o solo durante o período de incubação. Essa diferença operacional, associada à menor área superficial dos grânulos, contribui para explicar os percentuais menores observados nos compósitos em comparação com as matérias-primas.

No caso da rocha fosfática, a elevada disponibilidade inicial pode estar relacionada principalmente à maior área de contato entre as partículas e o solo. A aplicação na forma de pó favorece a interação direta da fase fosfatada com a umidade e com os diferentes componentes da matriz do solo. Após o aumento observado no primeiro período de incubação, verifica-se redução da disponibilidade de P, seguida de relativa estabilização dos valores entre 7 e 14 dias. Esse comportamento indica que a dinâmica do fósforo no solo não depende apenas da sua solubilização a partir da fonte, mas também das interações subsequentes com a matriz do solo. Assim, parte do fósforo inicialmente mobilizado pode ser progressivamente retida ou redistribuída entre diferentes frações, resultando na estabilização observada ao longo do período avaliado.

O lodo de esgoto apresentou comportamento diferente, com aumento progressivo da disponibilidade de fósforo até o 7º dia. Esse resultado pode estar relacionado à própria natureza da matriz do biossólido, na qual o fósforo se encontra associado tanto à fração mineral quanto à matéria orgânica. Durante a incubação, a umidade do solo e a atividade microbiológica podem favorecer gradualmente a transformação da matéria orgânica e a mobilização de parte do fósforo presente no material. No entanto, a pequena redução observada entre 7 e 14 dias indica que os processos de liberação e retenção ocorrem simultaneamente no solo, estabelecendo um equilíbrio dinâmico entre o fósforo liberado pelo material e suas interações com a matriz mineral e orgânica.

Quando apenas os compósitos organominerais são considerados, conforme apresentado em maior escala no detalhe da Figura 17, é possível observar diferenças entre as formulações que não são visualizadas no gráfico principal, devido à maior disponibilidade de fósforo no lodo

e, principalmente, na rocha fosfática. De modo geral, os tratamentos sem cura e aqueles submetidos a 14 dias de cura apresentaram aumento inicial da disponibilidade de P, seguido de redução progressiva até 14 dias de incubação. Por outro lado, os compósitos submetidos a 28 dias de cura apresentaram comportamento distinto, mantendo percentuais mais elevados de P disponível ao final do período avaliado. O tratamento LD:$RC_{2,5}$-28d apresentou redução entre o primeiro período e os 7 dias, seguida de relativa estabilização ou pequeno aumento aos 14 dias, enquanto o LD:$RC_{5,0}$-28d apresentou redução até os 7 dias e posterior aumento, atingindo aproximadamente 2,4% do P aplicado aos 14 dias. Embora esses resultados ainda não permitam estabelecer uma tendência definitiva, indicam que o tempo de cura pode influenciar a dinâmica de liberação de grânulos no solo, juntamente com o teor de cimento, a composição e as transformações estruturais do material durante a incubação.

A baixa disponibilidade de fósforo observada nos grânulos durante os primeiros 14 dias de incubação é coerente com os resultados obtidos anteriormente nos ensaios de liberação em água. Nessa condição, todos os materiais apresentaram baixa solubilização, com valores inferiores a 4% do fósforo aplicado, o que demonstra que a simples presença de água não é suficiente para promover elevada mobilização do P presente nas matrizes estudadas. Nos compósitos, esse efeito ainda está associado à estrutura granular, uma vez que a água precisa penetrar no interior do material, alcançar as fases que contêm fósforo, promover sua dissolução e, posteriormente, permitir a difusão das espécies dissolvidas para o meio externo. Dessa forma, a menor área superficial dos grânulos e a presença de uma matriz consolidada contribuem para limitar a liberação inicial de fósforo.

Por outro lado, os ensaios feitos em solução de ácido cítrico a 2% demonstraram que uma fração consideravelmente maior do fósforo presente nos materiais pode ser mobilizada quando as condições do meio favorecem sua solubilização. Nessa condição, foram observados percentuais de liberação superiores aos obtidos tanto em água quanto, até o momento, no experimento de incubação em solo. Esses resultados demonstram que a baixa disponibilidade observada dos compósitos no solo durante os primeiros 14 dias não implica necessariamente a ausência de fósforo potencialmente mobilizável, mas indica que sua liberação depende das condições químicas e biológicas presentes ao redor do grânulo. Como discutido anteriormente, o meio ácido favoreceu a mobilização de formas menos solúveis de fósforo, evidenciando a importância da acidificação e da complexação para aumentar a disponibilidade desse nutriente.

No entanto, condições de acidificação com intensidade semelhante à da solução de ácido cítrico utilizada no ensaio de imersão não ocorrem de forma contínua. Dessa forma, a mobilização do fósforo presente nos compósitos passa a depender de processos naturais capazes

de modificar localmente as condições químicas do ambiente. Entre esses processos, destaca-se a atividade de microrganismos do solo capazes de produzir ácidos orgânicos e de promover a solubilização de fosfatos minerais. Assim, a atividade microbiológica pode desempenhar um papel importante na eficiência desses materiais, especialmente na presença de fases apatíticas de baixa solubilidade provenientes da rocha fosfática. E a ação das raízes e da microbiota associada à rizosfera também pode gerar microambientes favoráveis à dissolução gradual dessas fases e à disponibilização do fósforo às plantas.

Nesse contexto, os resultados obtidos sugerem que estratégias adicionais de acidificação localizada podem representar uma alternativa para aumentar a eficiência dos compósitos organominerais. Uma possibilidade seria a associação dos grânulos a microrganismos solubilizadores de fosfato, capazes de produzir ácidos orgânicos durante seu metabolismo. Outra estratégia poderia envolver a incorporação de componentes que promovam acidificação gradual no entorno do grânulo ou a utilização de precursores capazes de gerar espécies ácidas durante sua transformação no solo. Essas abordagens poderiam favorecer a solubilização da rocha fosfática incorporada aos compósitos sem promover a disponibilização imediata de todo o fósforo, mantendo o princípio de liberação gradual proposto para os materiais.

De maneira geral, os resultados obtidos até 14 dias mostram que a forma física exerce influência significativa sobre a disponibilização de fósforo no solo. As fontes pulverulentas apresentaram maior disponibilidade, favorecidas pela elevada área superficial e pelo contato direto e permanente entre as partículas e a matriz do solo, enquanto os compósitos granulados apresentaram liberação mais limitada. Entre os grânulos, os resultados também sugerem influência do tempo de cura na dinâmica de disponibilização do fósforo, uma vez que as formulações curadas por 28 dias apresentaram maiores percentuais de P disponível ao final dos 14 dias de incubação, em comparação com a maioria dos demais tratamentos. No entanto, a continuidade do experimento será necessária para verificar se esse comportamento se manterá nos períodos posteriores. A liberação mais limitada observada para os compósitos está de acordo com a proposta de obtenção de materiais capazes de modular a disponibilidade do fósforo, embora seja necessário acompanhar os períodos posteriores de incubação para determinar se a liberação ocorrerá em magnitude adequada. A comparação com os ensaios em água e em ácido cítrico reforça ainda que há uma fração de fósforo potencialmente mobilizável nos compósitos e que estratégias de acidificação localizada, especialmente por processos microbiológicos, podem representar uma alternativa promissora para aumentar a eficiência agronômica dessas formulações.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que o lodo de esgoto proveniente da ETE-Franca apresenta características adequadas para sua utilização como matriz orgânica e nutricional na formulação de compósitos organominerais, em razão de seus teores de carbono, nitrogênio e fósforo. A rocha fosfática de Registro/SP, por sua vez, mostrou-se adequada como fonte complementar de fósforo, devido ao elevado teor de P_2O_5 e à presença de fases apatíticas identificadas por difração de raios X. A associação entre esses materiais permitiu aumentar o teor de fósforo das formulações em relação ao lodo isolado, mantendo simultaneamente a presença da fração orgânica proveniente do biossólido.

A incorporação do cimento Portland modificou a composição química dos compósitos, principalmente pelo aumento dos teores de CaO e pela redução relativa do teor de P_2O_5 em determinadas formulações. Entretanto, sua principal contribuição esteve relacionada à estruturação física dos materiais. Os ensaios mecânicos mostraram que o teor de cimento e o tempo de cura influenciaram diretamente a resistência dos compósitos, com maior consolidação estrutural das formulações contendo cimento ao final do período de cura, especialmente aos 28 dias. Esses resultados demonstram que o cimento atua como agente ligante, capaz de aumentar a coesão entre as partículas de lodo e de rocha fosfática, bem como de melhorar a integridade física dos materiais granulados.

A caracterização por microtomografia de raios X mostrou que os compósitos apresentam estrutura interna heterogênea, composta por regiões de densidades distintas, poros, trincas e macroporos distribuídos ao longo da matriz organomineral. A ausência de relação linear entre porosidade, teor de cimento e tempo de cura demonstrou que o comportamento mecânico dos materiais não pode ser explicado apenas pelo percentual total de poros. A distribuição e a conectividade dos vazios, a presença de fissuras e as interfaces formadas entre as frações orgânica, mineral e cimentícia também influenciam a resistência e, potencialmente, os mecanismos de entrada de água e de transporte de nutrientes no interior dos grânulos.

Os ensaios de liberação em água demonstraram baixa solubilização de fósforo nos materiais avaliados, com valores inferiores a 4% do P aplicado, indicando que a simples presença de água não é suficiente para promover a elevada mobilização do nutriente presente nas matrizes estudadas. Em contrapartida, a utilização de solução de ácido cítrico a 2% promoveu um aumento expressivo na solubilização de fósforo, evidenciando que uma parte relevante do P presente nos materiais pode ser mobilizada quando o meio apresenta condições favoráveis de acidificação e complexação. Dessa forma, os resultados mostram que a disponibilidade do fósforo está relacionada não apenas ao seu teor total, mas também às

características químicas e estruturais dos compósitos e às condições do meio em que esses materiais são inseridos.

Os resultados obtidos nos ensaios de incubação em solo corroboram essa interpretação. Durante os primeiros 14 dias, o lodo de esgoto e a rocha fosfática, na forma pulverulenta, apresentaram maior disponibilidade de fósforo do que os compósitos granulados. A maior área superficial e o contato direto das partículas pulverizadas com a matriz do solo favoreceram a mobilização do nutriente, enquanto os grânulos apresentaram disponibilização inferior a 3% do P aplicado nesse período. Esse comportamento evidencia a influência da forma física sobre a dinâmica de liberação e indica que a estrutura granular atua como uma barreira adicional à mobilização imediata do fósforo.

A comparação entre os diferentes meios de liberação evidencia um aspecto importante para o aprimoramento das formulações. Enquanto em água e nos primeiros períodos de incubação em solo os compósitos apresentaram baixa mobilização de fósforo, em solução de ácido cítrico foi possível acessar uma fração consideravelmente maior do nutriente. Esses resultados demonstram que há fósforo potencialmente mobilizável no interior das matrizes; porém, sua disponibilização depende da ocorrência de condições químicas que favoreçam a dissolução das fases fosfatadas.

Nesse sentido, os resultados obtidos indicam que uma das principais possibilidades de aprimoramento dos compósitos consiste na associação da estrutura granular a mecanismos que promovam acidificação localizada. A incorporação de microrganismos solubilizadores de fosfato representa uma estratégia particularmente promissora, uma vez que a produção de ácidos orgânicos durante o metabolismo microbiano pode favorecer a dissolução gradual das fases apatíticas da rocha fosfática. Também poderão ser avaliados agentes acidificantes, precursores de espécies ácidas ou componentes capazes de produzir microambientes favoráveis à solubilização do fósforo no entorno do grânulo.

A utilização dessas estratégias deve preservar uma das principais características pretendidas para os compósitos desenvolvidos: a liberação gradual do nutriente. O objetivo não consiste em promover a solubilização imediata de todo o fósforo presente na formulação, mas em alcançar um equilíbrio entre a resistência mecânica, a estabilidade estrutural e a disponibilidade do nutriente em períodos compatíveis com a demanda das plantas. Dessa forma, o controle da acidificação no entorno do grânulo poderá representar uma ferramenta importante para aumentar a eficiência do fósforo sem eliminar o efeito de modulação proporcionado pela matriz organomineral.

De modo geral, a combinação entre lodo de esgoto, rocha fosfática e cimento Portland permitiu desenvolver compósitos organominerais com composição nutricional relevante, estabilidade estrutural e capacidade de modular a mobilização de fósforo. O lodo atua como matriz orgânica e fonte de nutrientes, ou seja, a rocha fosfática promove o enriquecimento em fósforo e o cimento contribui para a consolidação física dos grânulos. Os resultados demonstram, ainda, que a composição química, a microestrutura e a forma física dos materiais estão diretamente relacionadas ao comportamento de liberação. Assim, a integração entre a estruturação física, o aproveitamento de resíduos, o enriquecimento fosfatado e os mecanismos de mobilização do nutriente constitui uma perspectiva relevante para o aprimoramento dos compósitos organominerais e para sua futura avaliação agronômica.

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

- Avaliar o escalonamento do processo de produção dos compósitos organominerais utilizando o lodo gerado na ETE-Franca, considerando a infraestrutura já disponível na unidade.
- Desenvolver e dimensionar uma linha simplificada de processamento, contemplando as etapas de mistura e homogeneização do lodo com a rocha fosfática e o cimento, extrusão ou granulação e secagem do produto.
- Avaliar o aproveitamento da estrutura de secagem existente na ETE-Franca, estabelecendo condições adequadas de temperatura, tempo e umidade final para obtenção de materiais estáveis e seguros.
- Investigar estratégias capazes de promover acidificação localizada no entorno dos grânulos, incluindo a incorporação de microrganismos solubilizadores de fosfato ou de componentes capazes de favorecer gradualmente a dissolução das fases apatíticas.
- Avaliar a eficiência agronômica dos compósitos em experimentos com plantas, considerando diferentes culturas, tipos de solo, doses e períodos de cultivo.
- Realizar ensaios de maior duração para avaliar a cinética de liberação de fósforo e outros nutrientes no solo, verificando o efeito residual dos materiais e sua capacidade de fornecer nutrientes de forma gradual.
- Realizar a avaliação sanitária e ambiental dos produtos obtidos, incluindo parâmetros microbiológicos, elementos potencialmente tóxicos e atendimento aos requisitos regulatórios aplicáveis ao uso agrícola.

- Desenvolver balanços de massa e energia do processo em escala ampliada, considerando a geração diária de lodo da ETE-Franca, a demanda de rocha fosfática e aditivos, o consumo energético e a capacidade dos equipamentos.
- Conduzir uma avaliação técnico-econômica do processo, comparando os custos associados à produção dos compósitos com aqueles relacionados à destinação convencional do lodo de esgoto.
- Avaliar, em escala piloto, a integração da rota de produção dos compósitos à infraestrutura da ETE-Franca, verificando a necessidade de equipamentos complementares e possíveis adaptações operacionais.
- Investigar a viabilidade ambiental e tecnológica da valorização do lodo em escala operacional, considerando redução da destinação a aterros, recuperação de nutrientes e inserção do processo nos princípios de economia circular.

REFERÊNCIAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – Nota Técnica – Regulamentação do Uso Agrícola do Lodo de Esgotos. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=15199#:~:text=%C2%A7%202%C2%BA.,ou%20o%20comerciante%20do%20produto. Acesso em: março/2026.

ABREU, A. H. M. de; LELES, P. S. dos S.; ALONSO, J. M.; ABEL, E. L. da S.; OLIVEIRA, R. R. de. Characterization of sewage sludge generated in Rio de Janeiro, Brazil, and perspectives for agricultural recycling. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 38, n. 4, p. 2433-2448, 2017.

ADAMS, B. E.; LAWHON, W. H.; PHILLIPS, B. C. Method of producing fertilizer granules. Depositante: Duval Corporation. US Patent US3630713A. Depósito: 22 jul. 1968. Concessão: 28 dez. 1971. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US3630713A/en. Acesso em: maio/2026.

ALEWELL, C.; RINGEVAL, B.; BALLABIO, C.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; BORRELLI, P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. Nature Communications, v. 11, n. 1, p. 4546, 2020.

ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos – Pesquisa Setorial, Macro indicadores. Disponível em: http://anda.org.br/pesquisa_setorial/. Acesso em: janeiro/2026.

BALKRISHNA, A.; KAUSHIK, P.; SINGH, S.; AGRAHARI, P.; KUMAR, B.; KUMAR, P.; ARYA, V. P. Potential use of sewage sludge as fertilizer in organic farming. Cleaner Waste Systems, v. 10, p. 100245, 2025.

BERNARDO, M. P.; GUIMARÃES, G. G. F.; MAJARON, V. F.; RIBEIRO, C. Controlled release of phosphate from LDH structures: dynamics in soil and application as smart fertilizer. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 6, n. 4, p. 5152-5161, 2018.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A.; GALVÃO; J. A. H.; GHINI, R. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto: descrição do estudo. P.109 a 141, 2015.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. **Uso de lodo de esgoto na agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1161234. Acesso em: 17 set. 2026.

BHARATHI, P. B.; VIKKY, K.; DEVI, M. V.; PRASAD, P. R.; SUJATHA, V. Studies on potassium chloride based controlled release fertilizer made from sand-cement matrix coated with naphthalene. International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology, v. 2, n. 2, p. 29-51, 2011.

BORTOLETTO-SANTOS, R.; PLOTEGHER, F.; MAJARON, V. F.; SILVA, M. G.; POLITO, W. L.; RIBEIRO, C. Polyurethane nanocomposites can increase the release control in granulated fertilizers by controlling nutrient diffusion. Applied Clay Science, v. 199, p. 105874, 2020.

BORTOLETTO-SANTOS, R.; PLOTEGHER, F.; RONCATO, V.; MAJARON, R. F.; MAJARON, V. F.; POLITO, W. L.; RIBEIRO, C. A strategy for multi-nutrient application in integrated granules using zein as a coating layer. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 66, n. 38, p. 9886-9895, 2018.

BRASIL – Ministério do Meio Ambiente – Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução nº 375 – 29/08/2006 – Diário Oficial da União – 30/08/2020 (revogada pela Res. CONAMA 498).

BRASIL – Presidência da República - Subchefia de Assuntos Jurídicos – Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 – Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: março/2026.

BRASIL – Ministério do Meio Ambiente – Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução nº 498 – 19/08/2020 – Diário Oficial da União – nº 161 de 21/08/2020 Seção 1 – p. 265 a 269.

BRASIL – Ministério do Meio Ambiente - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Subsídios para a revisão da Resolução CONAMA nº 375/2006: define critérios e procedimentos para o uso de lodo de esgotos. Brasília/2020

CAMINADA, S. M. L.; BOCCHIGLIERI, M. M.; PAGANINI, W. S.; VELINI, E. D. Avaliação do processo de compostagem de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto: legislação, parâmetros biológicos, comportamento dos nutrientes, e condições físico-químicas. Disponível em: https://doi.org/10.5327/276455760302002. Acesso em março/2026.

CETESB – Norma Técnica P4.230, São Paulo – Diário Oficial do Estado de São Paulo – Cad. I – Edição 131 29/08/2021 – P. 46 a 53.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Subsídios para a revisão da Resolução CONAMA nº 375/2006: define critérios e procedimentos para o uso de lodo de esgotos. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2020

CUESTA, A.; ZEA-GARCIA, J. D.; LONDONO-ZULUAGA, D.; de LA TORRE, A. G.; SANTACRUZ, I.; VALLCORBA, O.; DAPIAGGI, M.; SANFÉLIX, S. G.; ARANDA, M. A. G. Multiscale understanding of tricalcium silicate hydration reactions. Scientific Reports, v. 8, artigo 8544, 2018.

D'IMPORZANO G.; ADANI F. Measuring the environmental impacts of sewage sludge use in agriculture in comparison with the incineration alternative. Science of the Total Environment, v. 905, 167025, 2023.

DEGRYSE, F.; BAIRD, R.; DA SILVA, R. C.; MCLAUGHLIN, M. J. Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers - effect of soil pH, granulation and base excess. Plant and Soil, v. 410, n. 1-2, p. 139-152, 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - AGEITEC - BOEIRA R.C. Uso de Lodo de Esgoto. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/manejo/aproveitamento/uso-de-lodo-de-esgoto. Acesso em: março/2026

ESPINOZA, A. L. F. Physico-chemical properties and phosphorus solubilization of organomineral fertilizers derived from sewage sludge and phosphate rock. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

ESPINOZA, A. L. de F.; RANIRO, H. R.; LEITE, C. N.; PAVINATO, P. S. Physico-chemical properties and phosphorus solubilization of organomineral fertilizers derived from sewage sludge. Soil Systems, v. 7, n. 4, 100, 2023.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2024. The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 – Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms. Rome. https://doi.org/10.4060/cd1254en. Acesso em: setembro/2024.

FERGUSON, J. R. Controlled release fertilizer. Depositante: General Portland Inc. US Patent US4023955A. Depósito: 4 out. 1974. Concessão: 17 maio 1977. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US4023955A/en. Acesso em: maio/2026.

FREITAS, R. E. Expansão da Área Agrícola no Brasil, - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, IPEA - 2022 – Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes. Acesso em: maio/2026.,

GAPE-ESALQ. Lodo de esgoto na agricultura: uma forma de promover a economia circular - 2025 - Disponível em https://gape-esalq.com.br/lorem-ipsum-dolor-sit-amet-consectetur-adipiscing-elit-copy-2/. Acesso em set/2026.

GIROTO, A. S.; GUIMARÃES, G. G. F.; MAJARON, V.; KLAIC, R.; AVANSI, W.; RIBEIRO, C. Effect of Urea: Hydroxyapatite Composites for Controlled-Release Fertilization to Reduce P Complexation in Soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 55, n. 3, p. 302-312, 2024.

GUIMARÃES, G. G. F.; KLAIC, R.; GIROTO, A. S.; MAJARON, V. F.; AVANSI, W.; FARINAS, C. S.; RIBEIRO, C. Smart fertilization based on sulfur-phosphate composites: synergy among materials in a structure with multiple fertilization roles. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 6, n. 9, p. 12187-12196, 2018.

HASSAM, M. K.; SENKO, S.; VILLA, A.; GRAFOVA, E.; PAPPINEN, A.; KUITTINEN, S. Techno-economic evaluation of biofertilizer production using wastewater biosolids: case study from municipal wastewater treatment plants in northwest region of Russia. J Mater Cycles Waste Manag, 25, 3380–3394, 2023.

HOU, C.; LI, L; HOU, L.; LIU, B.; GU, S.; YAO, Y.; WANG, H. Sustainable and clean utilization of yellow phosphorus slag (YPS): activation and preparation of granular rice fertilizer. Materials, v. 14, n. 8, 2080, 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Censo Populacional – Brasil 2022. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/. Acesso em: janeiro/2026.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Estimativas de População – Brasil 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html. Acesso em: janeiro/2026

ITICESCU, C.; GEORGESCU, P.L.; ARSENI, M.; ROSU, A.; TIMOFTI, M.; CARP, G.; CIOCA, L.L. Optimal Solutions for the Use of Sewage Sludge on Agricultural Lands. Water, 13, 585, 2021.

JOHN, E.; LOTHENBACH, B. Cement hydration mechanisms through time: a review. Journal of Materials Science, v. 58, p. 9805-9833, 2023.

KABIRI, S.; BAIRD, R.; TRAN, D.N. H.; ANDELKOVIC, I.; MCLAUGHLIN, M. J.; LOSIC, D. Cogranulation of low rates of graphene and graphene oxide with macronutrient fertilizers remarkably improves their physical properties. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 6, n. 1, p. 1299-1309, 2018.

KAREF, S.; BENMARCE, K.; BOURAS, O.; EL-TONI, A. M.; ZHANG, K. Fertilizer potential and social perception of the agricultural reuse of sewage sludge and treated wastewater. Desalination and Water Treatment, v. 322, p. 101186, 2025.

KIBROM, A.A., JORDAN, C., PAULINE, C., DAVID, J.S. - Fertilizer, soil health, and economic shocks: A synthesis of recent evidence - ELSEVIER - disponível em https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306919225000971. Acesso em: set/2026.

LAWRENCIA, D.; WONG, S. K.; LOW, D. Y. S.; GOH, B. H.; GOH, J. K.; RUKTANONCHAI, U. R.; SOOTTITANTAWAT, A.; LEE, L. S.; TANG, S. L. Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release. Plants, v. 10, n. 2, artigo 238, 2021.

LI, L.; LI, H.; TONG, L.; LV, Y. Sustainable Agriculture Practices: Utilizing Composted Sludge Fertilizer for Improved Crop Yield and Soil Health. Agronomy, v. 14, n. 4, p. 756, 2024.

MAJARON, V. F.; SILVA, M. G.; PFEIFER, M.; BORTOLETTO-SANTOS, R.; VELLOSO, C. C. V.; KLAIC, R.; POLITO, W. L.; RIBEIRO, S. J. L.; BERNARDI, A. C. C.; FARINAS, C. S.; RIBEIRO, C. Interaction of *Aspergillus niger* in Double-Coated Urea Granules Reduces Greenhouse Gas Emissions from N Fertilization. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, v. 23, p. 4344-4355, 2023.

MAJARON, V. F.; SILVA, M. G.; BORTOLETTO-SANTOS, R.; KLAIC, R.; RIBEIRO, S. J. L.; POLITO, W. L.; BEVILAQUA, D.; FARINAS, C. S.; RIBEIRO, C. Bioactive Material with Microorganisms can Enhance the Micronutrients Solubilization and Sulfate Availability from Low Reactive Sources: Insight for Application as Coating Fertilizer Granules. Journal of Polymers and the Environment, v. 30, n. 6, p. 2602-2613, 2022.

MAJARON, V. F.; SILVA, M. G.; BORTOLETTO-SANTOS, R.; KLAIC, R.; GIROTO, A.; GUIMARÃES, G. G. F.; POLITO, W. L.; FARINAS, C. S.; RIBEIRO, C. Synergy between castor oil polyurethane/starch polymer coating and local acidification by A. niger for increasing the efficiency of nitrogen fertilization using urea granules. Industrial Crops and Products, v. 154, p. 112717, 2020.

MARTIN, D. F. Cementitious materials as binding agents in fertilizer granulation. Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, v. 10, n. 3, p. 289-294, 1971.

NOGUCHI, H.; ITO, H. Long-Term Experiment of Applying Sludge Fertilizer to Agricultural Land. Water Environment Journal, v. 6, n. 5, p. 473-480, 1992.

NIEKERK, V.; ELS, A.S.; VAN DES WAALS, J. C.; STEYN, C.E. Nutrient mineralization rates of sewage sludge under different treatment technologies. Water Research, v. 39, n. 12, p. 2541-2550, 2005.

PAVINATO, P.S., CIPRIANO, P.E. - Optimizing phosphorus use in tropical soils for sustainable farming. CABI Digital Library - https://doi.org/10.1079/soilsciencecases.2025.0009. Disponível em: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/soilsciencecases.2025.0009. Acesso em 09/2026.

PIASSA, V. A. Solubilidade de fertilizantes organominerais peletizados à base de biossólido e torta de filtro. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

SANTOS JÚNIOR, J. M. dos; COLEN, F.; FRAZÃO, L. A.; PEGORARO, R. F.; FERNANDES, L. A. Granulated organomineral fertilizers from by-products of the agricultural and forestry sector. Scientia Agricola, v. 82, e20240132, 2025.

SCHOLZ, R. W.; ULRICH, A. E.; ELITTÄ, M.; ROY, A. Sustainable use of phosphorus: A finite resource. Science of the Total Environment, v. 461-462, p. 799-803, 2013.

VÁCLAVKOVÁ, Š.; ŠYC, M.; MOŠKO, J.; POHOŘELÝ, M.; SVOBODA, K. Fertilizer and Soil Solubility of Secondary P Sources-The Estimation of Their Applicability to Agricultural Soils. Environmental Science & Technology, v. 52, n. 17, p. 9810-9817, 2018.

VISENTIN, R. Viabilidade econômica da compostagem do lodo de esgoto para uso agrícola. Holos Environment, v. 20, n. 2, 2020.

WORLD BANK GROUP. População Total. Disponível em: https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?_gl=1*1eb7vn8*_gcl_au*OTIzODY0NTUwLjE3MjU0NzI4OTA. Acesso em: janeiro/2026.

ŻUKOWSKA, G.; BIK-MAŁODZIŃSKA, M.; MYSZURA-DYMEK, M. The influence of stabilization technology on selected properties of municipal sewage sludge. Advances in Science and Technology Research Journal, v. 20, n. 1, p. 279-287, 2026.