

Grasiele da Silva Gouveia – gouveiagrasielle@gmail.com
Universidade Estadual Ponta Grossa, Departamento de engenharia civil
Campus Uvaranas - Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 – Uvaranas
CEP 84030-900 - Ponta Grossa -Paraná

Maria Magdalena Ribas Doll - mmrdoll@uepg.br
Universidade Estadual Ponta Grossa, Departamento de Engenharia Civil

ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL DE FORMULAÇÕES DE FERTILIZANTE ORGÂNICO BIODEGRADÁVEL COM APLICAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

Resumo: O tratamento de esgoto gera um subproduto chamado lodo de esgoto, este material passa a ser considerado biossólido depois de passar pela desinfecção que é realizada pela adição de cal e do armazenamento do material em lugar arejado por pelo menos 30 dias. Buscando uma destinação sustentável este material é usado como fertilizante por pequenos produtores, devido suas características nutritivas é aplicado na lavoura de maneira manual ou à lança. Tais métodos de aplicação podem ser prejudiciais ao aplicador e gerar uma contaminação ambiental pela dispersão do material. O objetivo deste trabalho foi avaliar aglutinantes biodegradáveis como aditivos ao biossólido para gerar um grânulo e facilitar a aplicação na agricultura pelo uso de máquinas agrícolas. Formulações prévias de grânulo foram desenvolvidas e examinadas em microscópio eletrônico de varredura para análise de sua estrutura. Como resultados, seis formulações foram aprimoradas no processo de otimização de material aglutinante. Foi possível observar que em alguns casos as moléculas do aglutinante à base de aglutinante orgânico biodegradável não foram dissolvidas no processo de moldagem, isso foi decorrente da quantidade do aglutinante (adicionado em excesso) ou pela temperatura baixa durante a mistura e a preparação do grânulo. Entretanto o trabalho obteve resultados satisfatórios, visto que foi obtida diferentes formulações de grânulo que podem ser avaliadas para produto comercial.

Palavras-chave: subproduto; fertilizante; aglutinantes biodegradáveis e grânulo.



SUSTAINABLE ALTERNATIVE OF BIODEGRADABLE ORGANIC FERTILIZER FORMULATIONS WITH SEWAGE SLUDGE APPLICATION

Abstract: *The sewage treatment generates a byproduct known as sewage sludge, which becomes biosolids after undergoing disinfection through the addition of lime and storage in an aerated place for 30 days. For a sustainable disposal, this material is utilized as a fertilizer by small-scale producers, due to its nutritive characteristics, it is manually applied or released mechanically. However, such application methods may pose risks to the applicator and lead to environmental contamination through material dispersion. The aim of this study was to evaluate biodegradable binders as additives to biosolids to produce granules, thereby facilitating application in agriculture through agricultural machinery. Previous granule formulations were developed and examined under a scanning electron microscope to analyze their structure. As a result, six formulations were enhanced during the optimization process of the binding material. It was observed that in some cases, organic binder molecules were not dissolved during the molding process, which resulted from either an excessive amount of organic binder added or the temperature during mixing and granule preparation. Nonetheless, the study yielded satisfactory outcomes, as different granule formulations were obtained, which can be assessed for commercial product viability.*

Keywords: *Byproduct; fertilizer; biodegradable binders; and granule.*

1. INTRODUÇÃO

Em decorrência do tratamento de esgoto, gera-se um resíduo sólido, classificado como lodo, este torna-se biossólido depois de submetido ao processo de desinfecção química chamada caleação, que consiste na adição de óxido de cálcio (cal) com misturador móvel, em proporções que contém, 30 a 50% (massa/massa) dos sólidos totais no lodo de esgoto.

Nesta medida, acontece uma reação exotérmica que higieniza e estabiliza o material, além de eliminar os microrganismos patogênicos que não foram exterminados no decorrer de todo processo. Com eliminação dos patógenos o lodo passa a ser denominado biossólido e a operação termina com o armazenamento de pelo menos 30 dias (FONSECA 2015).

A intensa produção de matéria prima acarreta em encontrar um destino sustentável para o material, aqui é explorado a reciclagem agrícola, por ser um material com características físico-químicas que o tornam um bom regularizador de solo, além de auxiliar na atividade biológica do solo (ANDREOLI 1999).

O propósito deste trabalho foi desenvolver formulações que possibilitem a peletização do biossólido pela utilização de aglutinantes de origem orgânica, para conceber um produto ecológico e de aplicação mais segura.

2. METODOLOGIA

2.1 Descrição do biossólido

O biossólido utilizado foi obtido das estações do próprio município, que é gerenciada pela Companhia de Saneamento de Ponta Grossa. A companhia realizou teste no biossólido para caracterizar o material, quanto a nutrientes para parâmetros agrônômicos, além de controlar parâmetros patogênicos a fim de garantir que o produto apresente segurança para uso no solo e para o operador aplicador, como determina a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 498, de 19 de agosto de 2020 (BRASIL, 2020).

O tratamento do lodo foi executado por meio de desaguentamento em leito de secagem, até a umidade de 40 a 50% (BOFF, 2021), posteriormente o mesmo foi estabilizado e desinfetado pelo processo de caleação, que consiste na adição de óxido de cálcio.



Na Figura 1 é possível observar o local de armazenamento do lodo na UGL (Unidade de Gerenciamento do Lodo) que deve ser coberto e alocado em lotes armazenados de 2 a 3 meses.

Figura 1: Armazenamento do lodo na UGL após caleação.



Fonte: As autoras (2021)

Os nutrientes encontrados em maioria no biossólido, 1,27% de umidade; 9,06 de pH em H_2O , 12,71% de C orgânico; 1,13% de N; 0,089% de K; 9,5% de Ca; 4,82% de Mg; 0,71% de S, e 1,23% de P. Os teores totais de metais, em $mg\ kg^{-1}$ foram: As, 2,93; Ba, 153,16; Cd, 2,99; Cr, 35,87; Cu, 108,70; Hg, 0,40; Mo, 19,76; Ni, 21,92; Pb, 40,85; Se, 4,36; Zn, 479,25 (BOFF; 2021).

Para o ensaio de granulometria foi utilizado 1 kg de lodo *in natura* (bruto, sem maceração) e 1 kg de lodo macerado com movimentos circulares, dentro do almofariz com o auxílio de pistilo. O biossólido foi caracterizado quanto a sua granulometria, adotando como referência a NBR 7181 (ABNT, 2016).

Este ensaio possibilitou a caracterização da curva granulométrica de cada tipo de biossólido (*in natura* e macerado).

2.2 Ensaios prévios

Foram adotados materiais de origem orgânica, esses à base de aglutinante orgânico, suas identidades não podem ser divulgadas por questões de patente. Foram testadas diferentes condições visando aglutinar com o biossólido com os aglutinantes, não houve racionalização na quantidade de aglutinante, nem na quantidade de água, pois a condição desejada era o material ser apto no quesito aglutinar para facilitar a moldagem, além da utilização do aglutinante mineral e coagulantes vegetais.

Foram desenvolvidos diferentes procedimentos laboratoriais com os materiais disponíveis, buscando encontrar a melhor maneira de combinar o aglutinante com o lodo. Para facilitar a dosagem foi fixado a quantidade de biossólido em todas as formulações.

A metodologia utilizada para a formulação, foi a pesagem do aglutinante e do biossólido separados, o aglutinante foi dissolvido na água aquecida em bico de Bunsen até a fervura e a consistência viscosa, a mistura tornou-se uma massa viscosa, foi adicionado o biossólido, que ficou completamente envolvido na massa. O procedimento de moldagem foi manual e formato cilíndrico, onde foi moldado e cortado os grânulos para análise tátil e visual visando a resistência do grânulo ao longo da secagem do material.

Nos ensaios prévios foram testadas diferentes formulações, além da quantidade de material que não foi racionalizada, foram feitas combinações de vários aglutinantes visando diminuir custos futuros e melhorar a trabalhabilidade da mistura. Além dos aglutinantes utilizados foram também utilizado aglutinante mineral como aditivo para regularizar o solo.

Para filtragem e organização das formulações, foi realizada uma tabela com atribuições de notas por um único indivíduo, devido as características subjetivas de cada moldagem. O primeiro item da



tabela correspondeu a moldagem, se houvesse caracterização do grânulo, o traço pontuava 1 para assertivo, caso contrário cessaria a análise.

O segundo item foi a umidade do grânulo, onde foi avaliado o comportamento da água na mistura, se a quantidade de água foi suficiente para gerar o grânulo sem desintegrar a pontuação atribuída era 2, se houvesse excesso ou falta de água a pontuação atribuída era 0 (zero), se a água fosse suficiente, todavia gerasse uma moldagem difícil, que se observava pelo aspecto seco da massa ou muito molhado e grudento a pontuação seria de 1.

O terceiro item foi a característica quanto a resistência após a secagem do grânulo, a avaliação foi feita aferindo compressão manual no grânulo e observando a facilidade de desestruturação do mesmo. Se a facilidade fosse alta a pontuação seria de 0 (zero), caso contrário seria de 1. O somatório de pontuação das características, selecionava os melhores traços.

Para cada tipo de aglutinante houve necessidade de alteração na quantidade de água. Cada material se comportava de maneira distinta frente ao aumento de temperatura, fato que fez a quantidade de aglutinante não ser constante em todas as formulações.

2.3 Formulações selecionadas

A partir das tabelas com notas de caracterização dos ensaios prévios, foram selecionadas formulações promissoras que seriam utilizados para análises aprimoradas. Também se considerou o custo dos aglutinantes. A baixa resistência de alguns aglutinantes também foi decisiva para o aprimoramento da fórmula visto que além de instabilidade afetaria análises futuras.

2.4 Avaliações das formulações selecionadas

Com as formulações definidas foi utilizada a técnica de MEV (microscopia eletrônica de varredura) para examinar a interface de cada formulação promissora. Essa técnica forneceu imagens internas de cada grânulo, sendo possível verificar a estrutura e como os aglutinantes se arranjam dentro do grânulo, além de analisar se os materiais foram dissolvidos e se havia presença de impurezas, bolhas, trincas internas.

Para realização da técnica foram caracterizados moldes do grânulo em tamanho reduzido compatível com o microscópio. O procedimento de moldagem foi o mesmo já mencionado anteriormente, as amostras foram armazenadas em estufa por 24 horas.

As amostras foram submetidas a secagem a vácuo, e depois foram recobertas por uma camada fina de ouro, utilizando a metodologia da técnica. Com as amostras preparadas, as mesmas foram adicionadas em pequenos moldes de metal e levadas para o equipamento para serem realizadas as imagens.

A densidade considerada como a relação entre a quantidade de massa, que ocupa um determinado volume definido, foi determinada nas formulações. Para análise foi necessário um período de armazenamento das amostras de 24 horas dentro da estufa para que a umidade não danificasse o equipamento e não ocasionasse interferência no resultado.

A metodologia adotada para obter a densidade foi o método de picnometria a gás hélio, onde foi medido o peso da amostra com uma balança de precisão, esse valor foi utilizado posteriormente no equipamento Ultrapycnometer 1000, que determina 3 medições de densidade a partir do volume da amostra.

3 Resultados e discussão

Os biossólidos foram caracterizados pela curva granulométrica, possibilitando a determinar o coeficiente de uniformidade (Cu) um material que possui valor de Cu menor do que 5 trata-se de solos muito homogêneos, se estiver no intervalo de 5-15, caracteriza-se como solo moderadamente homogêneo, e quando o Cu ultrapassa 15, é um solo heterogêneo.

De acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016), o lodo natural possui Cu de 2,75, sendo muito homogêneo e o lodo macerado possui Cu de 10 sendo moderadamente homogêneo.

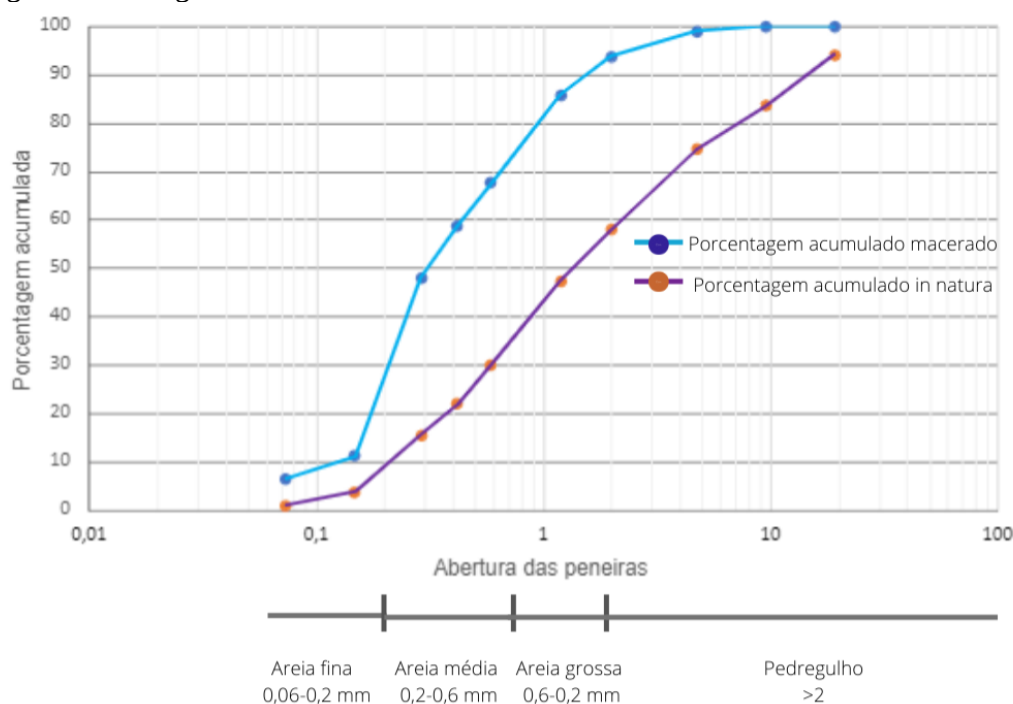


O coeficiente de curvatura determina que solos, com os valores de C_c menores que 1 correspondem a solos mal graduados e com grande número de vazios, fato que é apresentado nas duas caracterizações, o lodo natural 0,72 e o lodo macerado 0,82.

Quando se realiza um ensaio granulométrico de solo, os grãos se dividem em areia fina, areia média, areia grossa e pedregulho. Cada amostra possui uma distribuição de material diferente, logo cada curva também diverge.

Buscando mostrar as divergências entre os dois estados do lodo, tanto natural quanto macerado na Figura 2 foi plotado as duas curvas granulométrica no mesmo gráfico.

Figura 2: Curva granulométrica de lodo in natura e macerado



Fonte: A autora (2021)

Por meio da análise Figura 2, foi possível afirmar que o lodo natural apresenta uma maior quantidade de pedregulho, já o lodo macerado possui uma maior quantidade de areia média, e ambos apresentam quantidades semelhantes de areia fina.

Os aglutinantes foram caracterizados em moldagens sozinhos e combinados entre si, a Tabela 1 é um exemplo que contém as formulações e as atribuições de notas para uma formulação inicial. É importante comunicar que o trabalho está em fase de geração de patente, fato que impede a explanação do aglutinante utilizado, entretanto a matéria prima é a base de aglutinante orgânico.

Tabela 1: Tabela de caracterização de formulações

Aglutinante	Denominação	Moldagem caracterizada	Umidade	Quebra ou esfarelamento após seco	Total de pontos
Aglutinante (A)	5; 1; 4	1	1	0	2
	5; 2; 3	1	2	1	4
	5; 2; 4	1	2	1	4
	5; 3; 3	1	2	1	4



Continuação: Tabela 1: Tabela de caracterização de formulações

Aglutinante	Denominação	Moldagem caracterizada	Umidade	Quebra ou esfarelamento após seco	Total de pontos
Aglutinante A	5; 3; 4	1	0	1	2
	5; 4; 3	1	0	1	2
	5; 4; 4	1	1	1	3
Aglutinante (B+C)	5; 1; 1; 3	1	0	1	2
	5; 1; 1; 3,5	1	2	1	4
	5; 1; 1; 4	1	2	1	4
	05;1,5;1,5;4	1	2	1	4
	05;1,5;1,5;5	1	0	1	2

Fonte: A autora (2023)

Por meio da Tabela foi concluído que a quantidade de aglutinante está diretamente relacionada com a avaliação das formulações, a exemplo a pontuação de uma fórmula de aglutinante orgânico que possui quantidade mínima de aglutinante é a menor dos ensaios realizados, a relação não é proporcional visto que aumentar significativamente a quantidade de aglutinante não gera a melhor pontuação na avaliação. Mostrando a importância da realização das otimizações.

As análises com o aglutinante a foram bem sucedidas, gerando moldagens bastante resistentes, na Figura 3, é possível ver os grânulos realizados com este aglutinante, a liberação de água não é um fator preocupante nas formulações prévias, todavia o material foi racionalizado para evitar desperdícios. Nesse exemplo da imagem é possível verificar algumas fissuras apareceram no grânulo, a especulação para que elas tenham aparecido seja a variação na quantidade de aglutinante e água em cada fórmula.

Figura 3: Lodo moldado em conjunto com o aglutinante orgânico



Fonte: A autora (2021)

Os ensaios realizados com aglutinante mais nobre de valor aquisitivo mais alto, foram de fácil moldagem com um consumo maior de água, a estrutura se mostrou íntegra mesmo quando aplicado uma força para desestabilizar o grânulo, outra característica observada foi que com este material não houve

Realização



geração de pó, entretanto seu alto valor foi uma característica decisória visto que outros aglutinantes desempenhava o mesmo papel a baixo custo.

As formulações desenvolvidas com o aglutinante a apresentaram moldagens facilitadas com pouca quantidade de aglutinante, porém ele apresentou maior sensibilidade na quantidade de água, que variou em 0,5 mL.

Determinado os melhores aglutinantes, foram testadas novas formulações inserindo aglutinante mineral, por ser um material já utilizado na agricultura e se comportar como um regularizador de solo, a utilização do aglutinante mineral também infere uma menor quantidade de aglutinante. Na Tabela 2, estão as formulações que foram utilizadas como promissoras, na coluna aglutinantes está a ordem dos aglutinantes 1 e 2.

Tabela 2: Formulações promissoras desenvolvidas

Aglutinantes	Biossólido (g)	Quantidade 1 (g)	Quantidade 2 (g)	Água (mL)	Temperatura (°C)
Aglutinante 1 + aglutinante mineral	5	0,2	0,8	3	70
Aglutinante 1 + aglutinante mineral	5	0,3	0,7	2,5	74
Aglutinante 2 + aglutinante mineral	5	0,2	0,8	3	81
Aglutinante 2 + aglutinante mineral	5	0,3	0,7	3	89
Aglutinante 3	5	2	-	2,5	52
Aglutinante 4	5	1	-	2,5	54

Fonte: A autora (2023)

Na Tabela 2 foram alocadas as melhores formulações encontradas com os aglutinantes, com suas quantidades já otimizadas. Além do traço, foi colocado uma coluna de temperatura da mistura de água e aglutinante, que será um fator crucial para análise de custos, visto que uma exposição longa ao gás do equipamento pode influenciar no preço da mistura, deixando mais cara.

O objetivo do exame de MEV foi verificar o aglutinante frente ao biossólido, as imagens foram capazes de responder se as partículas do aglutinante se dissolveram no processo de moldagem envolvendo o biossólido, ou se havia moléculas íntegras. As moléculas íntegras geram menor aglutinação o que pode influenciar na resistência da fórmula.

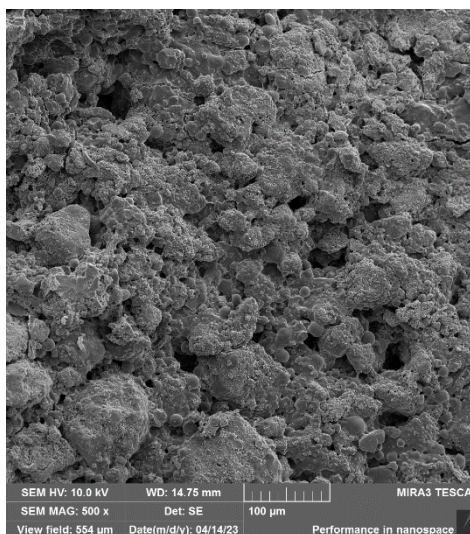
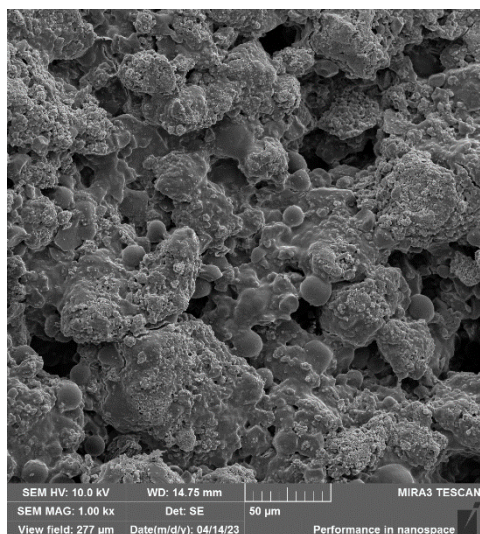
As formulações que possuem aglutinante 1, foram analisadas no MEV. Tanto o traço (5; 0,2; 0,8; 3), quanto (5; 0,3; 0,7; 2,5). Na primeira formulação foi possível constatar estruturas rígidas e com pouca quantidade de vazios, isso é constatado pela cimentação da mistura que está na localizada parte central da amostra.

Na segunda formulação, foi observado a presença em grande quantidade de moléculas arredondadas de aglutinante orgânico intactas. Segundo Barbosa et al (2020), o aglutinante orgânico pode ser encontrado nas formas arredondada, oval, truncada, poligonal e cilíndrica, a depender do processo de produção. Na Figura 4 pode ser observado o amido em seu formato estrutural arredondado, tal visualização é possível visto que é uma amostra que possui amido em grande quantidade o que é um fator que interfere diretamente na aglutinação do material.

A 1º amostra tem uma escala de 1.00 kx, as moléculas do amido não se desestruturaram, a película presente dá aspecto de liso na mistura mostrando homogeneidade na amostra. A 2º imagem possui aproximação de 500 x, é da mesma amostra é possível observar que a amostra apresenta bastante grumos, o que indica que apesar da imagem microscópica revelar que a matéria não está totalmente dissolvida, o material presente é suficiente para manter o pellet estruturado.



Figura 4: Microscopia eletrônica de varredura realizado com o aglutinante orgânico



Fonte: A autora (2023)

As formulações que possuem aglutinante 2 e aglutinante mineral, também foram analisadas (5; 0,2: 0,8: 3) e (5; 0,3: 0,7: 3). Na primeira formulação, a visualização do aglutinante orgânico é nítida, devido à quantidade de material utilizado, o mesmo acontece no segundo traço essas moléculas de aglutinante orgânico podem influenciar na resistência do grânulo, o que pode ser aferido através de um ensaio.

As formulações restantes foram realizadas com aglutinante 3 e 4, ambos os traços apresentaram grande quantidade de aglutinante orgânico sem dissolver, esta situação era esperada devido a quantidade de aglutinante orgânico utilizado nestas formulações que era superior aos demais. Essas formulações também caracterizaram uma película com aspecto liso, que foi formada pelo aquecimento do aglutinante orgânico na hora da moldagem.

. Foram analisadas as densidades dos traços promissores, os valores obtidos foram colocados na Tabela 3, para análise e discussão dos resultados.

Tabela 3 Ensaio de densidades em amostras promissoras.

Aglutinantes	Traço da fórmula	Densidade	Densidade média	Desvio Padrão
Aglutinante 1 + aglutinante mineral	5; 0,2; 0,8; 3	2,1831	2,1404	0,0808
Aglutinante 1 + aglutinante mineral	5; 0,3; 0,8; 2,5	2,2332		
Aglutinante 2 + aglutinante mineral	5; 0,2; 0,8; 3	2,1656		
Aglutinante 2 + aglutinante mineral	5; 0,3; 0,7; 3	2,2223		
Aglutinante 3	5; 2; 2,5	2,0382	2,0001	
Aglutinante 4	5; 1; 2,5	2,0001		

Fonte: As Autoras

Analisando a Tabela 3, ela caracteriza as amostras com um desvio padrão de aproximadamente 0,1, o que determinava que a densidade das amostras se manteve uniforme, mesmo com diferentes materiais aglutinantes, tal fato é atribuído pela quantidade de lodo demandado ser a mesma em todas as formulações, além da quantidade se sobressair em relação a quantidade de outros materiais.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tratamento de esgoto gera um material rico em matéria orgânica o lodo de esgoto, como este é um resíduo nutritivo ele é utilizado frequentemente como material fertilizante na agricultura, logo o objetivo do trabalho consiste em encontrar formulações para aglutinar o lodo com aglutinantes vegetais buscando um produto granulado, para melhorar a aplicação e torná-la mecanizada.

Inicialmente, foram realizadas formulações preliminares, essas foram avaliadas por meio de teste de propriedades subjetiva do material, este teste foi a moldagem e pressão no grânulo para verificar a liga do lodo com o aglutinante.

Através deste teste foi possível selecionar as melhores formulações para otimizar a quantidade de material aglutinante na fórmula, logo essas formulações são as mais econômicas e com características de moldagem boa.

Dentro das formulações encontradas foram selecionadas seis, para ser o que foi denominado ensaios promissores, as quais foram realizados teste de densidade e MEV para determinar o comportamento dos materiais.

Pode-se concluir que houve o desenvolvimento de seis formulações de geração de grânulo, às mesmas responderam bem aos ensaios e tem valor economicamente atrativo, sendo uma inovação no mercado agrícola.

5.1 Agradecimentos

Agradeço a Prof Dr Maria Magdalena Ribas Doll que forneceu orientação científica, suas correções e estímulo proporcionaram a realização do projeto. Além da ajuda do técnico de laboratório Cícero Guerellos, que auxiliou nas normas de procedimentos laboratoriais. Ao meu colega e também amigo Kaio Gustavo Gomes que esteve sempre presente e me auxiliou na realização deste artigo.

Ao Complexo de Laboratórios Multiusuários da Universidade Estadual de Ponta Grossa pelo suporte para realização da técnica de microscopia eletrônica de varredura, além do Departamento de Engenharia de Materiais que disponibilizou o laboratório para realização de ensaio de densidade. E, por último, à Fundação Araucária pelo incentivo à pesquisa e patrocínio da bolsa de estudos.

6. REFERÊNCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7181. Solo –Análise granulométrica. Rio de Janeiro.2016

ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Paraná). Companhia de Saneamento do Paraná (org.). Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. Curitiba: Finep/Prosab, 1999. 98 p

BARBOSA, Natália Alves; ANDRADE, Luan Alberto; PEREIRA, Joelma. Eletromicrografias de varredura de polvilhos doce e azedo. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 11, p. 93257-93261, 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução no 498, de 19 de agosto de 2020. Define os critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil: Seção 1, Atos do Poder Executivo, Brasília, DF, ano 158, n. 161, p. 265-269, 21 ago. 2020. Disponível em:<https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=atonormativo&id=726>.

BOFF, Liane Karina Correa. Projeto Agrônomo N°:09/2021 UGL ETE RONDA. Ponta Grossa: Sanepar, 2021.

FONSECA, Cecília Strzykalska. Aspectos legais da aplicação do biossólido gerado nas estações de tratamento de esgoto em uso agrícola. 2015.

Realização

