



UNIVERSIDADE DE UBERABA

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL**

VINICIOS MARGATO

**ESTUDO DA GRANULAÇÃO POR COMPACTAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
FERTILIZANTE ORGANOMINERAL**

UBERABA, MG
2025



VINICIOS MARGATO

**ESTUDO DA GRANULAÇÃO POR COMPACTAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
FERTILIZANTE ORGANOMINERAL**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Orientador (a):

Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis

Coorientador (a):

Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

Uberaba
2025

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

M336e Margato, Vinícios.
Estudo da granulação por compactação na produção de fertilizante organomineral / Vinícios Margato. – Uberaba, 2025.
36 f. : il., color.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Química. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis.
Coorientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.

1. Adubos e fertilizantes. 2. Engenharia química. 3. Fertilizantes. I. Assis, Leonardo Campos de. II. Finzer, José Roberto Delalibera. III. Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 631.8

Tatiane da Silva Viana – Bibliotecária – CRB-6/3171

VINICIOS MARGATO

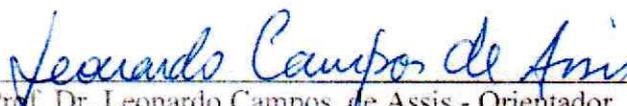
ESTUDO DA GRANULAÇÃO POR COMPACTAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
FERTILIZANTE ORGANOMINERAL

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

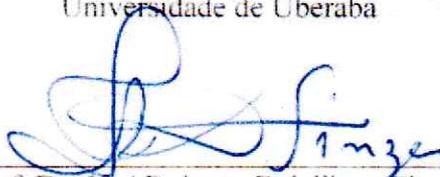
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.

Aprovado em: 31/03/2025

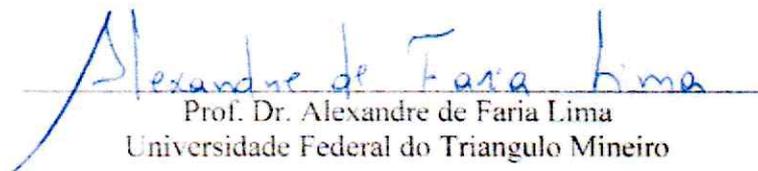
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Leonardo Campos, de Assis - Orientador
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. Alexandre de Faria Lima
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho as pessoas que me trouxeram até aqui, minha mãe, meus irmãos e a memória de meu pai.

Dedico as pessoas que me inspiraram estar aqui, Roberto Mattioli Silva, José Luiz Marini e o José Roberto Delalibera Finzer.

Dedico as pessoas que me suportaram até aqui, minha esposa Ilka e minha filhotita Maya.

AGRADECIMENTOS

À Deus!

À minha mãe, Iolanda, por todo amor e carinho.

À minha esposa, Ilka, pelo carinho, apoio e compreensão nos momentos mais desafiadores.

À minha pequena Maya, com todo o seu amor incondicional, suportando as minhas ausências, mesmo sem entender os motivos.

Aos meus mentores profissionais, Roberto Mattioli Silva, José Luiz Marini e Marins Viana pelos ensinamentos e inspiração.

À família Paiva Miranda da empresa SantaSafra, nas figuras de Luís Carlos de Miranda e Leonardo Paiva de Miranda, pela confiança, pela amizade e pelas oportunidades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis, pela compreensão, pela amizade e pela parceria.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer, pelo incentivo para que eu me ingressasse no programa de mestrado.

Aos meus colegas de trabalho, pelos momentos em que, quando estive ausente, fizeram minhas vezes na empresa.

À Labfert Análises laboratório onde realizei as análises e a Tomain Engenharia no desenvolvimento do projeto do equipamento piloto.

Aos órgãos de fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação (Processos: MPR-01119-16; APQ-01203-23)

RESUMO

A produção de fertilizantes organominerais granulados atende à demanda por práticas agrícolas mais sustentáveis, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos convencionais, que apresentam riscos ambientais, como lixiviação de nutrientes e contaminação de solos, além de valorizar a economia circular. Portanto avaliar a operação de compactação com rolos para produzir fertilizante organomineral granulado, levando em conta as variações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do granulado produzido se faz pertinente nesse cenário onde a busca por inovações no setor de fertilizantes brasileiro tem sido intensificada desde o fim da pandemia, o início de conflitos geopolíticos globais e o fortalecimento das práticas de ESG pelas empresas. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a operação de compactação com rolos para produzir fertilizante organomineral granulado, levando em conta as variações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do granulado produzido. Para isso, adotou-se metodologia experimental que se fundamentou em três etapas: i) moagem e padronização dos materiais, ii) mistura das matérias primas, e iii) compactação na célula de compactação. Projetou-se uma célula de compactação de bancada, fabricada em aço, utilizada para produzir os corpos de prova, que foram submetidos a compressão por uma prensa hidráulica com medidor de pressão. A eficácia da compactação foi feita em relação a análise de dureza e distribuição granulométrica pós compactação. Os resultados das análises granulométricas da mistura farelada convencional (Farelado) e do produto compactado (Compactado) indicam o aumento do tamanho de partícula de 0,85 mm para 4,08 mm. Em relação ao Índice de Dispersão de Partículas no produto compactado apresentou valor de 12, o que indica baixa tendência a segregação. Quanto à resistência mecânica, o aumento da aplicação de pressão de 15.000 kg/cm² para 30.000 kg/cm² representou muito pouco ganho de dureza dos grânulos. Além disso, o produto compactado apresentou uma maior uniformidade na concentração de nutrientes. Pode-se concluir que há viabilidade técnica na utilização da etapa de compactação na fabricação de fertilizante organomineral granulado.

Palavras-chave: Ensaio físico em fertilizantes; Granulação por compressão; Fertilizantes especiais.

ABSTRACT

The production of organomineral granulated fertilizers meets the demand for more sustainable agricultural practices, reducing reliance on conventional chemical fertilizers, which pose environmental risks such as nutrient leaching and soil contamination, while also promoting the circular economy. Therefore, evaluating the roller compaction operation to produce granulated organomineral fertilizer, taking into account variations in the physical, chemical, and mechanical properties of the granulated product, is pertinent in this scenario where the search for innovations in Brazil's fertilizer sector has intensified since the end of the pandemic, the onset of global geopolitical conflicts, and the strengthening of ESG practices by companies. In this context, the objective of this research was to evaluate the roller compaction operation to produce granulated organomineral fertilizer, considering variations in the physical, chemical, and mechanical properties of the granulated product. To achieve this, an experimental methodology was adopted, consisting of three stages: i) grinding and standardization of materials, ii) mixing of raw materials, and iii) compaction in a compaction cell. A benchtop compaction cell, made of steel, was designed and used to produce the test samples, which were subjected to compression using a hydraulic press equipped with a pressure gauge. The effectiveness of compaction was assessed based on hardness analysis and particle size distribution. The results of the particle size distribution analysis of the conventional powdered mixture (Powdered) and the compacted product (Compacted) indicate an increase in particle size from 0.85 mm to 4.08 mm. Regarding the Particle Dispersion Index, the compacted product showed a value of 12, indicating a low tendency for segregation. In terms of mechanical strength, increasing the applied pressure from 15,000 kgf/cm² to 30,000 kgf/cm² resulted in very little gain in granule hardness. Additionally, the compacted product exhibited greater uniformity in nutrient concentration. It can be concluded that there is technical feasibility in using the compaction stage in the manufacture of granulated organomineral fertilizer.

Keywords: Physical tests in fertilizers; Compression granulation; Special fertilizers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Gráfico de vendas de fertilizantes especiais	6
Figura 2	Gráfico de vendas de fertilizantes organominerais	7
Figura 3	Gráfico de investimento em PD&I	7
Figura 4	“Lei do mínimo” de Liebig	8
Figura 5	Cadeia de produção do fertilizante organomineral	10
Figura 6	Operação unitária de aglomeração agitativa ou granulação	11
Figura 7	Operação unitária de aglomeração compressiva ou compactação	12
Figura 8	Exemplos de processos de aglomeração compressiva ou compactação	13
Figura 9	Diagrama de compressibilidade de um pó típico	14
Figura 10	Reação em compactos de carbonato de magnésio quando prensados	16
Figura 11	Regiões de compressão em prensas de rolos	18
Figura 12	Gráfico de fator de força de rolamento em função da compressibilidade	19
Figura 13	Projeto da célula de compactação	24
Figura 14	Célula de compactação (vista lateral)	25
Figura 15	Célula de compactação (vista superior)	25
Figura 16	Prensa hidráulica	25
Figura 17	Fluxograma do processo de compactação	26
Figura 18	Moinho de facas	26
Figura 19	Projeto da unidade piloto do rolo compactador	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Distribuição granulométrica das misturas moídas	27
Tabela 2	Distribuição granulométrica	30
Tabela 3	Dureza média dos grânulos	31
Tabela 4	Análise química dos nutrientes garantidos	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Resumo dos grupos governantes para compactação	17
Quadro 2	Requisitos de pressão e energia para compactação	20
Quadro 3	Composição da formulação 14.02.14	24
Quadro 4	Tabela de interpretação do GSI	30

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Densidade compacta σ_T	14
Equação 2	Equação de compactação da forma	14
Equação 3	Carga do rolo L	19
Equação 4	Força de rolamento	20
Equação 5	Cálculo do SGN	27
Equação 6	Cálculo do GSI	30

LISTA DE BREVIATURAS E SIGLAS

FOC	Fertilizantes Orgânico Composto
FOM	Fertilizante Organomineral
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
PNF	Plano Nacional de Fertilizantes
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
IFDC	<i>International Fertilizer Development Center</i>
ABISOLO	Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal
PD&I	Projeto, desenvolvimento e inovação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COT	Carbono Orgânico Total

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
%	Porcentagem	%
ρ_b	Densidade aparente	g/cm^3
d_p	Tamanho médio das partículas	cm
σ_T	Resistência a tração do granulo	kgf/cm^2
ϵ_g	Porosidade do granulo intraaglomerado	-
H	Dureza do aglomerado ou compactado	kgf/cm^2
ρ	Densidade aparente de aglomerado ou granulo	g/cm^3
σ	Tensão normal do pó durante o cisalhamento	kgf/cm^2
σ_0	Tensão axial aplicada	kgf/cm^2
L	Carga do rolo	dyn

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GERAL	3
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	3
3	JUSTIFICATIVA	4
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1	CONTEXTO HISTÓRICO E A IMPORTÂNCIA DA AGRICULTURA	5
4.2	A IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DOS FERTILIZANTES ESPECIAIS	5
4.2.1	O setor agrícola e de fertilizantes especiais no Brasil e suas perspectivas	6
4.3	O FERTILIZANTE ORGANOMINERAL	8
4.3.1	A cadeia produtiva do fertilizante organomineral	9
4.4	UNIDADE DE MISTURA E GRANULAÇÃO DE FERTILIZANTES NPK	10
4.4.1	Granulação	11
4.4.1.1	Princípio do aumento de tamanho	11
4.4.2	Compactação de pó	12
4.4.2.1	Alimentação do pó	13
4.4.2.2	Densidade compacta	14
4.4.2.3	Resistência compacta	15
4.4.2.4	Pressão de compactação	15
4.4.2.5	Transmissão de tensão	16
4.4.3	Etapa de Compactação por pressão	16
4.4.3.1	Sistemas de granulação por rolo compactador	17
4.5	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO FERTILIZANTE	21
4.5.1	Tamanho da partícula	21
4.5.2	Densidade	22
4.5.3	Dureza	22
5	MATERIAL E MÉTODOS	23
5.1	MATERIAIS	23
5.1.1	Fertilizante Orgânico Composto	23
5.1.2	Fertilizante Mineral	23
5.1.3	Fertilizante Organomineral 14.02.14	23

5.1.4	Célula de compactação de bancada	24
5.2	PLANEJAMENTO E PREPARAÇÃO DO EXPERIMENTO	26
5.2.1	Descrição dos experimentos	26
5.2.2	Planejamento experimental	27
5.2.2.1	Caracterização física das misturas	27
5.2.3	Análise granulométrica	28
5.2.4	Análise de dureza	28
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	29
6.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE A COMPACTAÇÃO	29
6.2.1	Análise granulométrica	29
6.2.2	Análise de Dureza	31
6.2.3	Concentração dos nutrientes	32
6.2.4	Compactador de rolos	32
7	CONCLUSÕES E POSSÍVEIS DESDOBRAMENTOS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

Na China a utilização da matéria orgânica na manutenção da fertilidade do solo manteve a produção de arroz em 700 kg/ha, durante milhares de anos. Com o uso recente da combinação de materiais orgânicos e uma utilização crescente de fertilizantes minerais, atingiu-se uma média de 5.958 kg/ha (ISHERWOOD, 2000), mostrando que essa combinação pode elevar as produtividades no campo, se beneficiando da compostagem de materiais orgânicos disponíveis e o emprego racional dos fertilizantes minerais.

Os fertilizantes minerais compostos de macronutrientes (NPK) em sua grande maioria são comercializados na forma de grânulos, podendo ser, granulado onde todos os nutrientes estão no mesmo grânulo ou em misturas de grânulos, quando é feita uma mistura das matérias primas granuladas. Os fertilizantes orgânicos que representam a fração orgânica do fertilizante organomineral, ao contrário dos fertilizantes minerais, em sua grande maioria são comercializados na forma farelada. Do ponto de vista do processo industrial essa diferença na forma física apresenta uma grande dificuldade na mistura da parte mineral com a parte orgânica, de forma homogênea, já do ponto de vista agrônômico promove segregação das partículas e cria dificuldade de aplicação pelos implementos convencionais que são utilizados nas fazendas.

Na produção de produtos (NPK) granulados, a etapa de aglomeração é uma das principais utilizadas na sua produção, onde 50%-75% das matérias primas entram secas no processo e a aglomeração acontece pelo intertravamento das partículas sólidas, uma outra etapa é o de compactação onde os materiais entram secos em sua totalidade e a compactação acontece pela pressão exercida nas partículas sólidas (IFDC, 1998). Atualmente ambos os processos têm sido experimentados na produção de fertilizante organomineral, afim de compatibilizar a forma física do fertilizante organomineral com o fertilizante mineral.

Apesar do potencial do uso de fertilizantes organominerais, a produção eficiente envolve grandes desafios como a seleção adequada de matérias-primas e o controle das propriedades físicas, químicas e mecânicas das partículas. Uma dificuldade no processo produtivo é justamente garantir a uniformidade da granulação e a resistência mecânica dos grânulos, que afetam diretamente o desempenho no campo. Além disso, o equilíbrio entre a compactação e a porosidade do fertilizante é essencial para uma boa liberação de nutrientes (ARTYUKHOV et al., 2021; SKRYLNYK, ARTEM'YEVA e KOLPAKOV, 2020).

Nesse sentido, a compactação é uma etapa fundamental no processo de produção de fertilizantes organominerais, especialmente na forma granular. Esse processo garante que os nutrientes sejam liberados de forma controlada e de acordo com as necessidades das culturas,

além de melhorar a eficiência do uso de fertilizantes e minimizar impactos ambientais. Pesquisas destacam que o uso de matérias-primas como leonardita, junto com compostos minerais como nitroamofoska, proporciona melhorias significativas na composição química e no desempenho agrônômico dos fertilizantes organominerais (BOUHIA et al., 2022; VAKAL et al., 2023).

A produção de fertilizantes organominerais compactados atende à demanda por práticas agrícolas mais sustentáveis, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos convencionais, que apresentam riscos ambientais, como lixiviação de nutrientes e contaminação de solos. Além disso, fertilizantes organominerais compactados têm mostrado resultados promissores na retenção de nutrientes e na melhoria da qualidade do solo, o que é fundamental para a agricultura moderna e o aumento da produtividade agrícola (LI et al., 2022; VAKAL et al., 2023)

A revisão bibliográfica desta dissertação contextualiza o crescente uso de fertilizantes especiais na agricultura brasileira, em específico do fertilizante organomineral e faz um apanhado geral dos benefícios de sua utilização nas Seções 4.1 e 4.2, apresenta os conceitos de fertilizantes e seus aspectos técnicos na Seção 4.6, faz uma breve descrição dos tipos de etapas de mistura, aglomeração e compactação de fertilizantes na Seção 4.4. Os aspectos de qualidade física dos fertilizantes são elencados na Seção 4.6 e dão suporte para a discussão dos resultados presente na Seção 6. O assunto-alvo dessa dissertação começa a ser tratado na Seção 4.4 com as comparações dos mecanismos de granulação, conceitos e efeitos.

A eficiência do processo de compactação com rolos é discutida na Seção 6.2 que também aborda aspectos de engenharia na construção de equipamentos com vistas a evitar perdas de produção e produtividade, enquanto a Seção 5 discute métodos de preparação para a produção de fertilizante organomineral granulado.

Por fim, este trabalho propõe a utilização do processo de granulação por compactação com rolos na produção de fertilizante organomineral granulado, aplicando o conhecimento da variação do comportamento das matérias primas orgânicas.

O sistema foi testado com o uso de uma célula de compactação em bancada. A partir destes resultados, a investigação mais aprofundada e otimização operacional deste tipo de processo se mostram viáveis para futuros estudos como o teste com aditivos e rolos nervurados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a operação de compactação com rolos para produzir fertilizante organomineral granulado, levando em conta as variações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do granulado produzido.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Propor a utilização da técnica de granulação por compactação com rolos como substitutivo a misturas fareladas e granulação por agitação.

Avaliar as propriedades mecânicas, físicas e químicas do fertilizante organomineral granulado produzido por compactação em relação aos padrões estabelecidos *pelo International Fertilizer Development Center (IFDC)* para o produto.

3 JUSTIFICATIVA

Por ser a destinação de resíduos orgânicos um problema grave tanto no aspecto ambiental quanto econômico, a utilização desses resíduos como fertilizantes é uma saída economicamente viável como sustentável. No sentido da melhor forma de se produzir um fertilizante organomineral de qualidade baseando-se no processo industrial de fabricação das misturas NPK granuladas se mostra uma técnica viável, sendo necessário que se atue de modo a desmistificar e incentivar com um sistema simplificado de fabricação. Essas considerações se inserem dentro da Economia Circular. Fertilizantes organominerais têm muitos desafios em diversas áreas, como em relação à necessidade de apresentar umidade reduzida como pellets ou grânulos, que favorecem sua manipulação e nesse sentido, a inovação é chave para o desenvolvimento da tecnologia, que deve ser apoiada por intervenções políticas para resolvê-los (SAKRABANI, 2024). Logo, como a granulação por compactação é relativamente mais simples e mais econômica que a aglomeração, faz-se necessário que, do ponto de vista da engenharia, essa técnica seja estudada e testada de maneira a observar sua efetividade no que tange a diminuição de custo de implantação, fornecendo uma opção de fertilizante que atenda à necessidade de conciliar o baixo teor de umidade e a efetividade na disponibilidade de nutrientes. Os resultados podem servir como referência para que o investidor decida, dentro da sua possibilidade, se a técnica se aplica ao caso real. Além disso, novos métodos propostos podem se mostrar mais eficientes que os existentes, gerando economia e melhor uso dos recursos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CONTEXTO HISTÓRICO E A IMPORTÂNCIA DA AGRICULTURA

Evidências arqueológicas levam a crer que a domesticação de espécies vegetais e animais ocorreu há cerca de 10.000 a 12.000 anos. Entre as espécies vegetais destacam-se todos os cereais primários, leguminosas economicamente importantes, tubérculos e espécies animais. O processo pode ter começado diante da escassez de alimentos quando os homens ainda dedicavam a tarefa de caçar e coletar alimentos, já não conseguiam trazer comida suficiente para casa e decidiram que algo precisava ser feito para garantir um suprimento mais permanente e confiável. Isso foi alcançado semeando sementes das mesmas espécies de grãos selvagens que elas vinham coletando por incontáveis milênios. Assim, a agricultura nasceu e com o seu desenvolvimento, a condição da humanidade começou a melhorar significativamente. Um suprimento alimentar mais estável resultou em melhor nutrição e no desenvolvimento de um estilo de vida estável, elevando a taxa de sobrevivência e ainda a um crescimento populacional mais rápido (BORLAUG, 2003).

Segundo dados da Nações Unidas, através de Departamento de Relações Econômicas e Sociais, Divisão de População, estima em seu relatório sobre a População Mundial de 2024, a população mundial atingiu o número de 8 bilhões de habitantes e que os seres humanos no planeta devem chegar aos 8,5 bilhões em 2030, atingindo seu ponto mais alto em meados da década de 2080. Neste crescimento a maior contribuição vem de países subdesenvolvidos, que são mais afetados pela fome.

Esse crescimento populacional demanda uma quantidade maior de alimento e diminui a área disponível para ser cultivada. Nesse paradigma de mais demanda por alimento e menos área para produção, o uso de fertilizantes mais eficientes e ambientalmente correto surge como uma ferramenta essencial na produção de alimentos para o Brasil e o mundo.

4.2 A IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DOS FERTILIZANTES ESPECIAIS

A busca por inovações no setor de fertilizantes brasileiro tem sido intensificada desde o fim da pandemia, o início de conflitos geopolíticos globais e o fortalecimento das práticas de ESG pelas empresas.

Em 2022 o Governo Federal lançou Plano Nacional de Fertilizantes (PNF), programa que visa diminuir a alta dependência externa desse insumo, fomentando oportunidades

importantes para o seguimento de fertilizantes organominerais, que se colocam como solução eficiente e sustentável para o aumento de produtividade no campo.

A cada dia mais, os profissionais que atuam no campo têm sido demandados para uma visão integrada dos sistemas de cultivos, e o fertilizante organomineral se coloca como uma bioeconomia cíclica. Em se tratando de solo, os fertilizantes organominerais melhoram as características químicas, físicas e biológicas do ambiente.

4.2.1 O setor agrícola e de fertilizantes especiais no Brasil e suas perspectivas

No ano 2023 em função da tendência de queda nos preços de venda das commodities agrícolas e dos fertilizantes, especialmente os minerais convencionais, a taxa de câmbio e as condições climáticas tradicionalmente mais voláteis em uma região tropical como em nosso país, provocou uma redução significativa na janela de plantio da soja, que em muitos casos demandou replantio e causou impacto na segunda safra.

Nesse ambiente hostil para o produtor rural a decisão de compra tardia comprometeu a logística de entrega dos insumos e foi necessária uma revisão geral no pacote tecnológico a ser utilizado na produção. Neste cenário, os diversos insumos para a produção agrícola foram impactados em intensidade diferentes o que resultou num impacto significativo do faturamento na indústria de insumos agrícolas.



Figura 1 - Fonte: Revista Cultivar (2023).

Os fertilizantes especiais, que vinham de uma trajetória de crescimento expressivo nos últimos 10 anos, tiveram um crescimento menor em faturamento, mas houve um aumento continuado da adoção dessa tecnologia (ABISOLO, 2024). A venda de fertilizantes especiais nos últimos anos é mostrada na Figura 1.

Os produtos mais impactados foram os fertilizantes organominerais e orgânico sólidos de aplicação via solo, em função do forte impacto que os fertilizantes minerais convencionais exercem na sua formação de preço. A venda de fertilizantes organominerais é descrita na Figura 2.

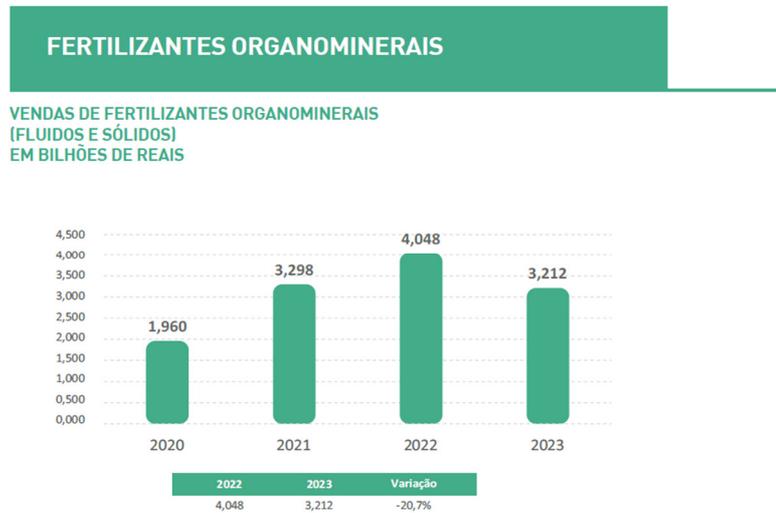


Figura 2 - Fonte: ABISOLO (2024)

Mesmo com esse crescimento menor, o setor continua investindo em projeto e desenvolvimento. Estima-se que o setor investe 2,8% do seu faturamento em PD&I, como pode ser visto na Figura 3 a seguir os valores em milhões de reais investidos.



Figura 3 - Fonte: ABISOLO (2024)

4.3 O FERTILIZANTE ORGANOMINERAL

Desde o início das práticas agrícolas os agricultores adubam suas terras com materiais orgânicos para manutenção e recuperação da fertilidade das terras de cultura. E os melhores resultados eram obtidos quando a matéria orgânica aplicada estava bem decomposta, transformada em húmus, surgindo a “teoria humista da alimentação vegetal” (KIEHL, 2013).

Quase sempre, o solo natural não possui a quantidade suficiente de nutrientes para manter o equilíbrio nutricional da planta o que, associado à outras características físicas e ambientais, impede o desenvolvimento das culturas. Os nutrientes para as plantas são classificados segundo a quantidade requerida por elas, como macronutrientes primários, macronutrientes secundários e micronutrientes.

A categoria dos macronutrientes primários é composta por Nitrogênio, Fósforo e Potássio, além de Carbono, Oxigênio e Hidrogênio, os macronutrientes secundários são Cálcio, Magnésio e Enxofre e, por fim, os micronutrientes assim chamados devido a menor quantidade requerida, são eles Boro, Cloro, Cobalto, Cobre, Ferro, Manganês, Molibdênio e Zinco.

O químico alemão Justus von Liebig em 1842, desenvolveu um importante conceito de nutrição de plantas, chamado de “Lei do Mínimo” (Figura 4). De acordo com este conceito, o crescimento de uma planta é limitado por um fator de crescimento particular que está no menor suprimento disponível para ela. De nada adianta haver abundância na disponibilidade de um determinado nutriente se outro, em menor quantidade, limita o desenvolvimento de uma determinada muda. Sua “teoria mineralista da alimentação vegetal”, provava que as plantas podiam viver na ausência da adubação orgânica (KIEHL, 2013).

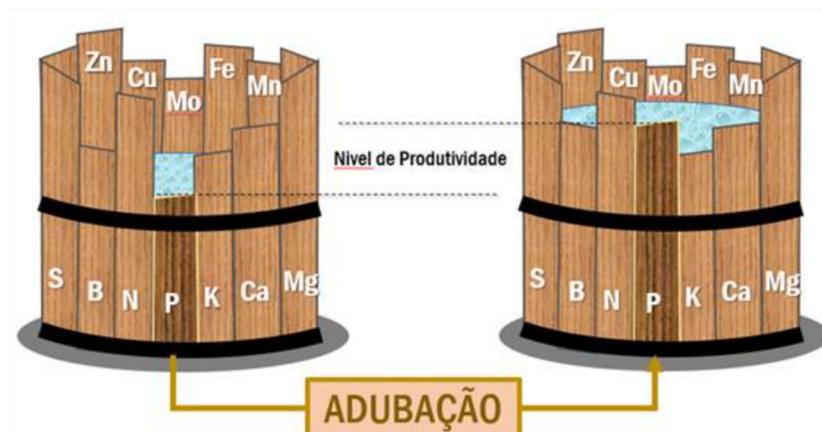


Figura 4 – “Lei do mínimo” de Liebig (Revista Cultivar, Flávio Bonini).

A partir da soma dessas duas teorias e os resultados obtidos durante anos em que só se utilizava adubo orgânico e os resultados eram positivos, surgiu a adubação orgânica e por consequência o fertilizante organomineral.

Sakrabani (2024) realizou uma interessante análise SWOT (*Strengths, Weakness, Opportunities and Treats* – em português, FOFA, Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças) sobre fertilizantes organominerais na agricultura e apontou como oportunidades características: créditos de carbono, inovação, monitoramento por IoT (*Internet of Things*), AI (*Artificial Intelligence*) e RS (*Remote Sensing*), entre outras.

O fertilizante organomineral é um material resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos (MAPA, 2004). Podendo ser aplicado diretamente ao solo, solubilizado ou aplicado em nível foliar.

Li. et.al. (2022), realizaram um experimento de dois anos investigando mudanças nos nutrientes do solo e a caracterização espacial da interação organomineral por meio da aplicação de diferentes proporções de fertilizante orgânico com a mesma quantidade de Nitrogênio e verificou-se que o aumento de dosagem de fertilizante orgânico ajudou o sequestro de carbono e nutrientes do solo e também favoreceu na construção da associação organomineral.

4.3.1 A cadeia produtiva do fertilizante organomineral

Basicamente a cadeia produtiva do fertilizante organomineral é composta por oito elos no total apresentados a seguir. Na parte mineral, o primeiro é a extração mineral que promove o fornecimento das matérias primas básicas para a indústria que são a rocha fosfática, o enxofre, o gás natural e rochas potássicas. Na etapa seguinte ocorre a fabricação dos produtos químicos inorgânicos, que produz as matérias primas básicas e intermediárias, o ácido sulfúrico, ácido fosfórico e amônia anidra. Na indústria de fertilizantes simples são fabricados o superfosfato simples (SSP), o superfosfato triplo (TSP), o fosfato monoamônio (MAP), o sulfato de amônio (SAM), a ureia e cloreto de potássio, entre outros.

Na parte orgânica, o primeiro é a geração do resíduo orgânico, de origem animal, as camas de aviários, esterco de galinha poedeiras, confinamento bovino e outros, de origem vegetal as tortas de filtro da agroindústria, de papel e celulose, e outros que são destinados aos processadores desses resíduos que fazem a compostagem desses materiais, produzindo o fertilizante orgânico composto.

Os fertilizantes minerais simples e o fertilizante orgânico composto são então enviados para as chamadas misturadoras de fertilizante a granel, que fazem a mistura física das matérias

primas produzindo as chamadas formulações NPK, encerrando a parte fabril da cadeia produtiva.

As misturas NPK, são comercializadas (no atacado e no varejo) pelos canais de venda e logística para o produtor rural, este último pode adquirir esses produtos nas revendas e cooperativas agrícolas ou mesmo diretamente com as misturadoras.

A Figura 5 mostra um esquema simplificado da cadeia de produção do fertilizante organomineral

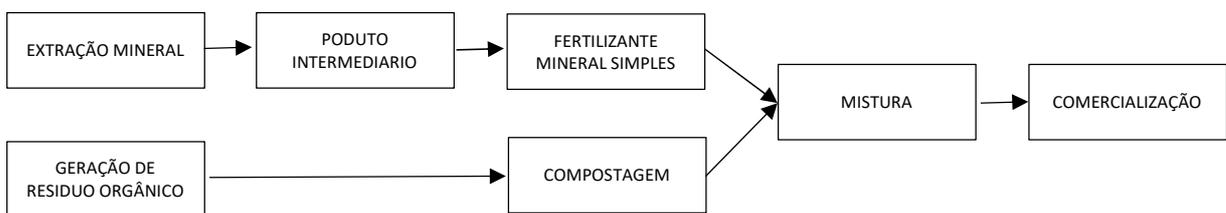


Figura 5 – Cadeia de produção do fertilizante organomineral

Várias pesquisas demonstram que metodologias químicas, termoquímicas e biológicas são igualmente eficientes para obtenção de produtos com propriedades de fertilização satisfatórias e a seleção de um processo adequado depende principalmente da natureza da matéria-prima utilizada e do mercado-alvo (BOUHIA et al., 2022).

4.4 UNIDADE DE MISTURA E GRANULAÇÃO DE FERTILIZANTES NPK

Segundo Kiehl (2013) o preparo do fertilizante organomineral tem sido feito quase que exclusivamente pelas indústrias.

A indústria de fertilizante organomineral em quase sua totalidade da produção convencional produz este material a partir da mistura física dos fertilizantes minerais quase sempre na forma granulada com o fertilizante orgânico composto na forma farelada, resultando num produto sem especificação granulométrica definida e mais adequado a aplicação via lanço no campo.

Já existem algumas empresas produzindo o fertilizante organomineral pela técnica de peletização e granulação, seja todos os nutrientes no mesmo pelete ou grânulo, ou o pelete ou grânulos do fertilizante orgânico composto misturado fisicamente com as demais matérias primas minerais, formando uma mistura de grânulos, esse material pode ser utilizado nas adubadeiras de sulco.

Mais recentemente a técnica de aglomeração por compactação vem ganhando força no cenário nacional, porém ainda tem desafios a serem superados, mas se mostra tecnicamente e economicamente viável.

4.4.1 Granulação

Segundo Ennis (2006), o aumento de tamanho é qualquer operação pela qual pequenas partículas são aglomeradas ou compactadas em massas maiores e relativamente permanentes e que possa distinguir as partículas originais. A aglomeração de partículas é amplamente utilizada nos mais variados tipos de indústrias químicas e agroindustriais e o termo aglomeração engloba uma variedade de operações unitárias empregadas no aumento do tamanho das partículas por aglomeração, seja pelo método de agitação (granulação) ou compressão (compactação).

4.4.1.1 Princípio do aumento de tamanho

A formação de agregados maiores por meio de colagem do material alimentado conforme descrito no item anterior, de forma comum pode se dar por agitação (granulação) conforme ilustrado na Figura 6, uma alimentação de partículas é introduzida em um tambor rotativo onde é revolucionada, para formar um produto granulado ou de forma alternativa a mistura de partículas é alimentada em um dispositivo de compressão que forma o produto aglomerado através de uma pressão exercida ilustrado na Figura 7.

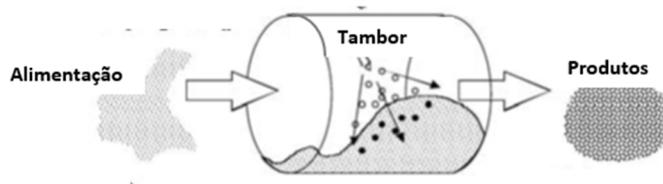


Figura 6 - Operação unitária de aglomeração agitativa, ou granulação.

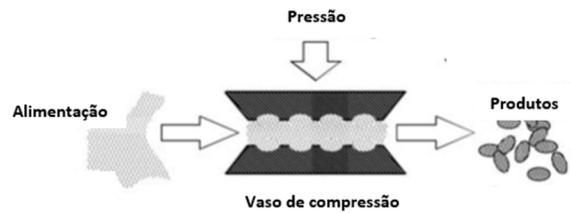


Figura 7 - Operação unitária de aglomeração compressiva, ou compactação

Os objetivos do aumento de tamanho de partículas é a produção de formas estruturais úteis, facilitar a distribuição e a medição, eliminar riscos ou perdas no manuseio de pó, melhorar a apresentação física do produto, aumentar a densidade em massa para armazenamento, criação de misturas não segregantes de matérias primas em pó, controle de solubilidade e outros.

A operação de granulação por compactação em rolos, segundo Ennis (2006), é capaz de produzir grânulos maiores que 1 mm com densidade de alta para muito alta, em uma escala acima de 50 tons/h, quase sempre requer operações de moagem e mistura subsequente.

A etapa de granulação é regida por quatro etapas principais (ENNIS, 2006), umedecimento e nucleação, coalescência ou crescimento, consolidação e densificação, e quebra ou atrito, enquanto a etapa de compactação inclui enchimento ou alimentação de pó, aplicação e remoção de tensão e ejeção do comprimido no caso de técnicas de compressão confinada. A escolha da técnica de aglomeração determina o padrão de mistura do produto antes da aglomeração.

4.4.2 Compactação de pó

As técnicas de compactação ou compressão de aglomeração abrangem uma variedade de operações unitárias com vários graus de confinamento ilustrado na Figura 8, variando de completamente confinado, como no caso da formação de comprimidos, a não confinado, como no caso da prensagem em rolos. Na Figura 8 é mostrado exemplos aglomeração compressiva ou compactação. Compactação a seco: (a) formação de comprimidos, (b) prensagem por rolo, (c) briquetagem, (d) extrusão por pistão, extrusão de pasta: (e) extrusão de parafuso, (f) peletização de mesa, (g) peletização de rolo duplo, (h) peletização de rolo concêntrico e (i) extrusão de dente.

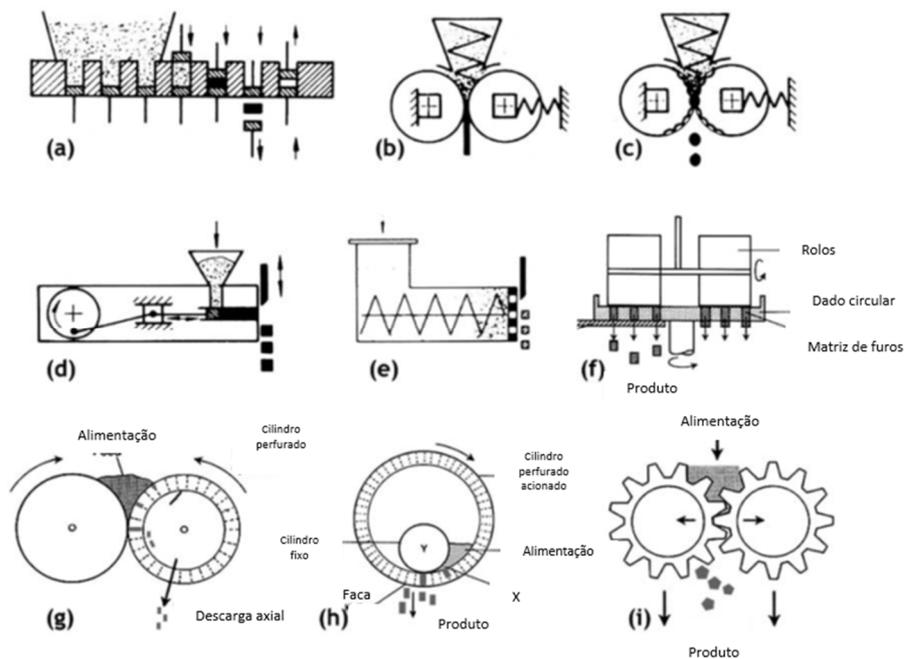


Figura 8 - Exemplos de operações de aglomeração compressiva ou compactação. (PIETSCH, 1992)

O sucesso da compactação é determinado, pela capacidade da fluidez livre do pó, facilidade de compactação, formação de ligações interpartículas permanentes e manutenção da resistência durante a descarga de tensão, além da forte influência das propriedades mecânicas da alimentação.

4.4.2.1 Alimentação do pó

Para uma operação normal de compactação é imprescindível o controle da densidade aparente dos materiais alimentados bem como a padronização da densidade da mistura. A diminuição do tamanho de partículas, o aumento da distribuição do tamanho e a diminuição da dureza das partículas geram um aumento na resistência do pó durante a alimentação, dificultando o escoamento do material. Lubrificantes podem ser utilizados com o objetivo de modificar o atrito da matriz sem alterar as taxas de escoamento do pó. Outro fator importante é a permeabilidade do gás em massa, ela controla a pressão do gás desenvolvida dentro do pó a granel durante a alimentação. Quanto menor a permeabilidade do pó será necessário mais tempo para a depressurização do gás após o movimento do pó. A permeabilidade diminui com a diminuição do tamanho das partículas.

4.4.2.2 Densidade compacta

A resistência compacta é capacidade que o material tem de suportar forças ou cargas sem falhar e depende do número da força das ligações criadas durante a compactação, que aumentam com o aumento da densidade compacta que mostra o seu nível de compactação.

$$\sigma_T = \frac{9}{8} \left(\frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \right) \frac{H}{a^2} = A \left(\frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \right) \frac{\gamma \cos \theta}{a} \quad \text{Equação (1)}$$

Com:

$A = 9/4$ para estado pendular;

$A = 6$ para estado capilar

O preenchimento de grandes buracos com partículas da distribuição de tamanho original e o preenchimento de buracos menores que as partículas originais por fluxo plástico ou fragmentação, são mecanismos de compactação importantes. A Figura 9 mostra um diagrama de compressibilidade quando a densidade é medida em uma ampla faixa de pressão.

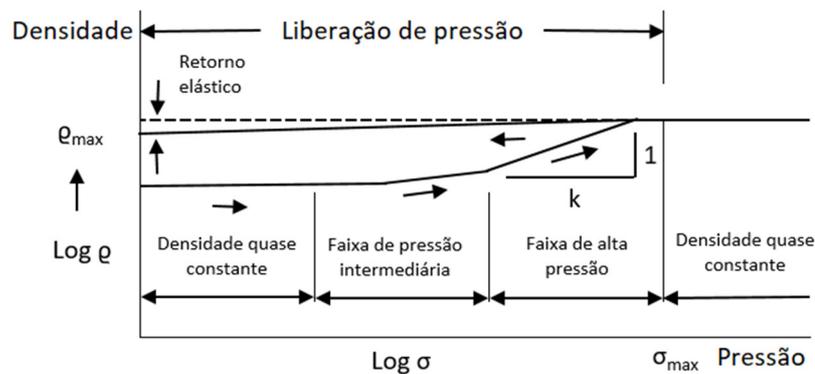


Figura 9 - Diagrama de compressibilidade de um pó típico ilustrando quatro estágios de compactação – Adaptado pelo autor.

A inclinação das regiões de pressão intermediária e alta é definida como $1/\kappa$, onde κ é a compressibilidade do pó. A densidade a uma pressão arbitrária σ é dada por uma equação de compactação da forma:

$$\rho = \rho_0 \left[\frac{\sigma}{\sigma_0} \right]^{1/\kappa} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde: ρ_0 é a densidade a uma pressão ou tensão arbitrária σ_0 .

4.4.2.3 Resistência compacta

Tanto o tamanho das partículas quanto a resistência da ligação controlam a resistência compacta final para uma dada densidade compacta ou vazia, Equação (2). (KRUPP, 1967) mostrou que a força adesiva entre duas partículas comprimidas varia inversamente com a dureza e é proporcional à força compressiva inicial e à energia de superfície das partículas (PERRY'S, 2008).

Embora a energia de superfície e a deformação elástica desempenhem um papel, o aumento da deformação plástica nos contatos das partículas com a diminuição da dureza é provavelmente o principal mecanismo que contribui para a formação de grandes ligações permanentes e compactação bem-sucedida na prática.

Para obter resistência significativa, (BENBOW, 1983) descobriu que uma pressão de escoamento crítica deve ser excedida, a qual é independente do tamanho, mas aumenta linearmente com a dureza das partículas. A resistência também aumenta linearmente com a pressão de compactação, com a inclinação inversamente relacionada ao tamanho das partículas.

4.4.2.4 Pressão de compactação

A pressão mínima de compactação é a pressão que induz deformação plástica significativa ou escoamento das partículas ou grânulos de alimentação; ou seja, a resistência das partículas/grânulos deve ser excedida, de modo que essa pressão exceda quaisquer forças de descarga que induzam falha compacta. A deformação plástica é necessária para produzir alguma medida de resistência compacta final. Embora a fragmentação frágil também possa ajudar a aumentar a densidade compacta e os pontos de ligação entre partículas, no final, algum grau de deformação plástica e intertravamento é necessário para atingir alguma resistência compacta mínima.

A baixa permeabilidade do pó e o gás aprisionado podem destruir a ligação permanente. Por outro lado, a pressão de compactação é limitada, pois à medida que a pressão aumenta, os efeitos elásticos também aumentam. Durante a descarga de pressão, a recuperação elástica e a expansão do gás podem induzir a formação de falhas ao destruir a ligação que foi originalmente criada pela deformação plástica e adesão. Portanto, a maioria dos materiais tem uma faixa de pressão de compactação permitida.

4.4.2.5 Transmissão de tensão

Após definir a faixa de pressão de compactação necessária, o compactador deve ser projetado para atingir essa pressão desejada dentro da geometria compacta para um determinado tempo de carga e permanência. Os pós não transmitem uniformemente o estresse aos fluidos, à medida que a pressão é aplicada a um pó em uma prensa de matriz ou de rolo, várias zonas no compacto são submetidas a diferentes intensidades de pressão e cisalhamento. A Figura 10 mostra distribuições típicas de pressão e densidade para compactação de matriz uniaxial.

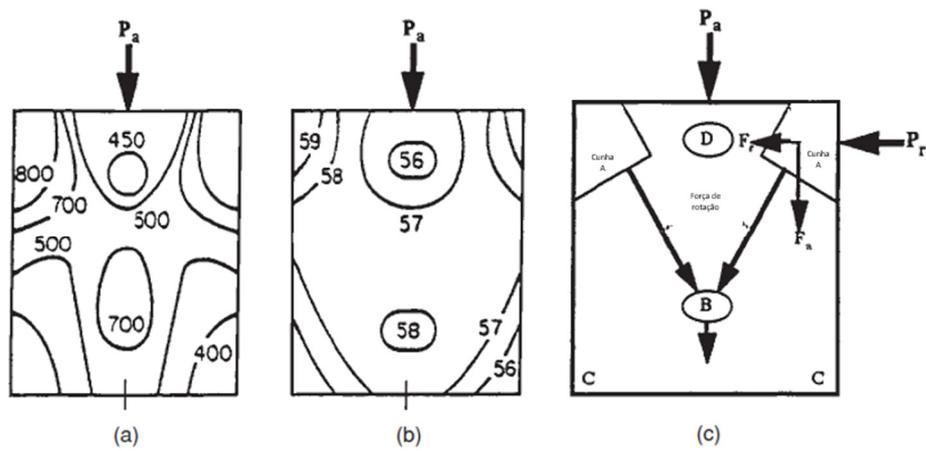


Figura 10 - Reação em compactos de carbonato de magnésio quando prensados ($P_a = 671$ kgf/cm²). (a) Níveis de contorno de tensão em quilogramas por centímetro quadrado. (b) Contornos de densidade em porcentagem de sólidos. (c) Força de reação desenvolvida na cunha responsável pelos padrões de tensão e densidade. (TREM, 1957).

4.4.3 Etapa de compactação por pressão

A escolha e o sucesso do tipo aglomeração compressiva ou compactação por pressão depende da utilização e transmissão de eficazes da força externa aplicada e da capacidade do material de formar e manter ligações interpartículas permanentes durante a compactação e descompressão (PERRY'S, 2008). O controle do processo se dá pela geometria do espaço confinado, pela natureza das cargas aplicadas, paredes confinantes e as propriedades físicas do material particulado.

Os compactados obtidos pelo processo de compactação a seco tem densidades e pressões significativamente maiores que os produtos obtidos pela técnica de aglomeração por agitação.

Segundo Ennis (2006), a dureza do pó, o atrito, tamanho das partículas e a permeabilidade impactam de forma significativa o desempenho do processo e nas pressões de compactações requeridas.

O Quadro 1 traz algumas regras gerais para o sucesso da compactação a seco.

Processo de classificação	As principais propriedades que regem a formulação aumentam com:	Os principais parâmetros que regem o processo aumentam com:
Taxa de transmissão de estresse (alta desejável)	Diminuindo o atrito da parede Aumento do atrito do pó Permeabilidade em massa decrescente	Diminuindo a folga e a proporção do aspecto da matriz
Tempo de desaeração relativo (baixo desejável)	Diminuição da dureza das partículas Aumento da energia de superfície	Aumento da taxa de produção
Adesão permanente relativa (baixo desejável)	(Veja também índices de Hiestand)	Aumento da pressão de compactação

Quadro 1 - Resumo dos grupos governantes para compactação (ENNIS, 2006). – Adaptado pelo *autor*

Uma maior transmissão de tensão melhora a uniformidade da pressão em todo o compacto. A redução do tempo de desaeração da alimentação em pó diminui as falhas e delaminação durante o descarregamento, e a melhor forma de fazer isso é aumentando a taxa de produção. O aumento das ligações permanentes melhora como o aumento da força aplicada devido a uma transmissão de tensão. O aumento da fluidez do pó melhora ajudam a aumentar as taxas de alimentação.

4.4.3.1 Sistemas de granulação por rolo compactador

Nesse sistema as prensas de rolo compactam a matéria-prima à medida que ela é transportada para o espaço entre dois rolos que giram em velocidades iguais conforme a Figura 11. O deslizamento e o rearranjo de partículas ocorrem acima do ângulo de contato, e a compactação do pó em alta pressão ocorre na região antiderrapante abaixo do ângulo de contato.

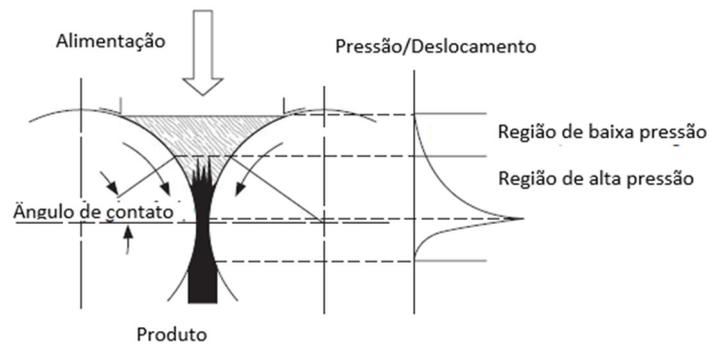


Figura 11 - Regiões de compressão em prensas de rolos.

A geometria da superfície dos rolos determina o tamanho e a forma do aglomerado. Reentrâncias nas superfícies dos rolos formam briquetes em vários formatos, já os rolos lisos ou ondulados produzem uma folha sólida, que é desagregada posteriormente em equipamento de moagem.

Segundo Ennis (2006) as prensas de rolo proporcionam uma vantagem mecânica ao amplificar a pressão de alimentação P_0 para um valor máximo P_m . Esta pressão máxima P_m e o tempo de compactação do rolo controlam a densidade compacta do material compactado. De modo geral, à medida que o tempo de compactação diminui (por exemplo, aumentando a velocidade do rolo), a pressão mínima necessária para compactações de qualidade aumenta. Pode haver também um limite de pressão superior para materiais friáveis ou materiais elásticos propensos à delaminação. A amplificação da pressão ocorre em duas regiões da prensa (Figura 11). Acima do ângulo de aperto, ocorre deslizamento entre o material e a superfície do rolo, à medida que o material é forçado para dentro dos rolos, com pressões intermediárias variando de 1 a 10 psi. A energia é dissipada principalmente através da superação do atrito e da coesão das partículas. Abaixo do ângulo de aperto, não ocorre deslizamento, pois o pó é comprimido em um compacto e a pressão pode aumentar até vários milhares de psi.

O desempenho geral da prensa e sua vantagem mecânica (P_m/P_0) dependem das propriedades mecânicas e de atrito do pó (PERRY'S, 2008). O ângulo de aperto α geralmente aumenta com a diminuição da compressibilidade κ , ou com o aumento do ângulo de atrito do rolo ϕ_w e do ângulo de atrito efetivo ϕ_e . Os pós são facilmente comprimidos e têm alta aderência por atrito na parte alta dos rolos. A relação de pressão da vantagem mecânica (P_m/P_0) aumenta e o tempo de compactação diminui com a diminuição do ângulo de aperto, uma vez que a pressão é concentrada em uma área de rolo menor. Além disso, a vantagem mecânica geralmente aumenta com o aumento da compressibilidade e do atrito de rolamento.

O fator mais importante que deve ser determinado em uma determinada aplicação é a força de prensagem necessária para a produção de compactos aceitáveis. A carga do rolo L (força de separação do rolo dividida pela largura do rolo) está relacionada à pressão máxima desenvolvida e ao diâmetro do rolo é dada pela Equação (3).

$$L = \frac{F}{W} = \frac{1}{2} f P_m D \propto P_m D^{1/2} (h + d)^{1/2} \quad \text{Equação (3)}$$

onde: F é a força de separação do rolo, D e W são o diâmetro e a largura do rolo, f é um fator de força de rolamento dependente da compressibilidade κ e da espessura da folga, conforme mostrado na Figura 12, h é a amplitude da abertura e $d/2$ é a profundidade do bolso para rolos de briquete. (PIETSCH, 1992.) A pressão máxima P_m é estabelecida com base na densidade compacta e qualidade necessárias, e é uma função importante da distância da folga do rolo e das propriedades do pó, conforme discutido acima, particularmente a compressibilidade.

Pequenas variações nas propriedades de alimentação podem ter um efeito pronunciado na pressão máxima P_m e no desempenho da prensa. As prensas de rolo são dimensionadas com base na pressão máxima constante. A carga necessária do rolo aumenta aproximadamente com a raiz quadrada do aumento do diâmetro do rolo ou da largura da folga.

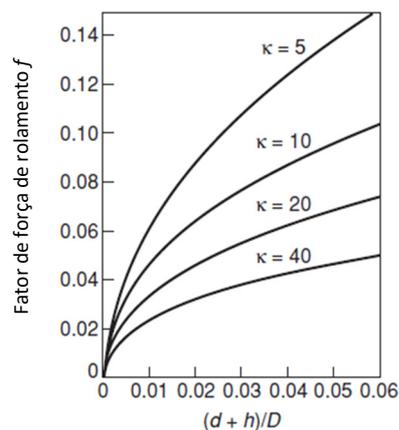


Figura 12 - Fator de força de rolamento em função da compressibilidade κ e da distância de folga adimensional $(d + h)/D$. (PERRY'S, 2008)

A força de rolamento apropriada é então quantificada da seguinte forma:

$$F_2 = F_1 = \sqrt{\frac{D_2}{D_1}} \sqrt{\frac{(h+D)_2}{(h+D)_1}} \left(\frac{W_2}{W_1}\right) \quad \text{Equação (4)}$$

Pode ser difícil obter a escala geométrica da distância do vão na prática. Além disso, o impacto do ar aprisionado e do desarejamento deve ser considerado como parte do aumento de escala.

A largura permitida do rolo é inversamente relacionada à força de prensagem necessária devido a considerações de projeto mecânico. O rendimento de uma prensa de rolos com velocidade de rolo constante diminui à medida que a força de prensagem aumenta, pois, a largura de rolo permitida é menor.

Alguns valores médios para a força de prensagem e energia necessárias para comprimir uma série de materiais em máquinas de briquetes do tipo rolo são fornecidos no Quadro 2.

Faixa de Pressão kg/cm ²	Energia requerida KWh/ton.	Tipo de material		
		S/ Aglutinante	C/ Aglutinante	Quente
Baixo 35 – 1.400	2 – 4	Fertilizantes mistos, minérios de fosfato, xistos, ureia	-	Minérios de fosfato, ureia

Quadro 2 – Requisitos de pressão e energia para compactação (PERRY'S, 2006) – Adaptado pelo autor.

Durante a compressão na região de deslizamento, o ar que escapa pode induzir fluidização ou pulsação irregular da alimentação. Esse efeito, que é controlado pela permeabilidade do pó, limita a velocidade de laminação permitida da prensa e também pode levar à delaminação compacta. Aumentos na velocidade de rolagem ou diminuições na permeabilidade exigem pressões de alimentação maiores.

Os avanços recentes no projeto de prensas de rolos concentram-se principalmente na obtenção de rápida desaeração da alimentação, projeto de parafuso (duplo ou simples), carregamento de parafuso e considerações de vácuo para remover o ar aprisionado. Foi demonstrado que as flutuações na pressão de alimentação do parafuso estão correlacionadas com a frequência de voltas, o que provoca variações de densidade nas folhas que saem dos rolos (MILLER, 2005).

4.5 QUALIDADE FÍSICA DO FERTILIZANTE

O conteúdo nutricional de um fertilizante é a maior razão para uso desses materiais na agricultura, porém a qualidade física tem papel determinante na aceitação pelo mercado de determinado produto e principalmente na escolha do produtor rural (IFDC, 1998). A qualidade física está atrelada a finalidade de uso de cada fertilizante, para as rochas fosfáticas é desejável que as partículas estejam finas para facilitar a solubilidade no solo, já os fertilizantes nitrogenados de liberação lentas que as partículas sejam maiores, entre outros. Essa qualidade física é observada pelos produtores rurais em fatores como aplicabilidade (fluidez do fertilizante no implemento de aplicação) e segregação, não se limitando a esses.

As reclamações de clientes sobre os fertilizantes organominerais em sua maioria estão relacionadas as propriedades físicas: baixa fluidez nas adubadeiras, segregação dos componentes e higroscopia excessiva (CARVALHO, 2018). Para as propriedades físicas o MAPA controla apenas a umidade máxima e a distribuição granulométrica (MAPA, 2020)

4.5.1 Tamanho da partícula

A medição do tamanho de partícula é um teste físico importante que é rotineiramente aplicado a materiais fertilizantes quase tão frequentemente quanto a análise química (IFDC, 1998). Esse controle varia do tipo de produto, o manuseio pretendido e seu uso final. Tal controle é realizado por diversas razões e entre as mais relevantes, o efeito na resposta agrônômica, nas propriedades de armazenamento e manuseio, operação de mistura e aplicação no campo.

O conhecimento sobre o tamanho das partículas e sua distribuição (perfil granulométrico) é um fator imprescindível na caracterização de um produto. A distribuição granulométrica de um fertilizante é representada pelo tamanho médio das partículas que compõem uma determinada amostra.

Existem várias normas e técnicas para determinar a distribuição granulométrica de uma amostra, entre elas: peneiramento, sedimentação gravitacional, microscopia e difração por luz laser. A mais comum e também a mais amplamente utilizada, é o peneiramento sendo a menos dispendiosa, alta confiabilidade e baixo nível de conhecimento técnico na sua aplicação. Essa técnica pode ser usada em uma ampla faixa de tamanho, de 100 mm a cerca de 20 μm (JILLAVENKATESA et al., 2001).

4.5.2 Densidade

Densidade é a massa por unidade de volume do material. Pode ser determinado três tipos de densidade *Bulk*, aparente e verdadeira (IFDC, 1998).

A densidade *bulk* é densidade aparente considerando os espaços vazios entre as partículas, sendo utilizada no dimensionamento de embalagens e equipamentos, enquanto a densidade aparente não é considerada os espaços vazios entre as partículas uma variação nela pode resultar em variação na dureza dos grânulos, na capacidade de retenção de umidade e nas propriedades de armazenamento (IFDC, 1998).

4.5.3 Dureza

Grânulos de fertilizantes devem ter estabilidade mecânica suficiente para suportar o manuseio normal sem fraturar e sem descamação excessiva com formação de pó. Existem três tipos distintos de testes reconhecidos como desejáveis, resistência ao esmagamento, à abrasão, e ao impacto. Quase sempre é realizado apenas o teste de dureza, que mede resistência apenas ao esmagamento. No entanto se o grânulo apresenta uma boa resistência a um tipo de ação mecânica é uma indicação razoável de boa estabilidade geral (IFDC, 1998).

O teste de resistência ao esmagamento (Dureza) é definido pela ISO como a força mínima requerida para quebrar um único grânulo. Muito utilizado para a previsão do comportamento do material nas operações de manuseio e armazenamento. Ela é mensurada aplicando uma pressão em cada grânulo.

O teste de resistência a abrasão é a resistência a formação de pó e finos, resultantes do contato do grânulo com grânulo e do grânulo com o equipamento durante o manuseio. Ela é determinada pela medição de pó e finos gerados por uma amostra quando aplicando uma força de atrição sob os grânulos (IFDC, 1979).

5 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia experimental empregada neste trabalho foi baseada na experiência de granulação em bancada, ensaios físicos em amostras de fertilizantes e metodologias acadêmicas, que permitiu a interpretação de dados. Como resultado, obteve-se dados reais para serem utilizados no projeto de um compactador para fertilizantes organominerais.

5.1 MATERIAL

5.1.1 Fertilizante Orgânico Composto

O fertilizante orgânico composto utilizado no experimento foi coletado na empresa SantaSafra, o FOC foi produzido a partir da compostagem de esterco de galinhas poedeiras. O FOC foi caracterizado quanto à teores dos nutrientes e distribuição granulométrica. As determinações foram realizadas segundo metodologia oficial MAPA (2024).

5.1.2 Fertilizante Mineral

Os fertilizantes minerais utilizados no experimento também foram coletados na empresa SantaSafra, como fonte de Nitrogênio, Fósforo e Potássio utilizou-se os fertilizantes minerais simples, Ureia, Fosfato Mono Amônio e Cloreto de Potássio. Os fertilizantes minerais foram moídos para a utilização e caracterizado quanto à teores dos nutrientes e distribuição granulométrica. As determinações foram realizadas segundo metodologia oficial MAPA (2024).

5.1.3 Fertilizante Organomineral 14.02.14

O fertilizante organomineral utilizado no experimento foi produzido na etapa de mistura do processo de fabricação por compactação (Figura 16). As determinações foram realizadas segundo metodologia oficial MAPA (2024).

A formulação escolhida para o experimento foi o NPK 14.02.14 por ser uma formulação amplamente utilizada na cultura de café no sul de Minas Gerais. O mesmo foi obtido pela mistura de matérias primas minerais e fertilizante orgânico composto conforme o Quadro 3.

Matéria Prima	N total (%)	P ₂ O ₅ CNA+Água (%)	K ₂ O Água (%)	COT (%)	Umidade (%)	Massa (kg)
FOC	1,2	2	2	21,5	5,5	474
Ureia	46	0	0	0	0,5	287
Fosfato Mono Amônio (MAP)	11	52	0	0	2,5	21
Cloreto de Potássio (KCl)	0	0	60	0	0,4	218
FOM 14.02.14	14	2	14	10	3	1000

Quadro 3 – Composição da formulação 14.02.14

5.1.4 Célula de compactação de bancada

Os grânulos foram produzidos utilizando uma célula de compactação de bancada fabricada em aço carbono conforme a Figura 13. A célula foi construída de tal forma que possibilitasse a colocação das matérias primas, realizar a compressão e a retirada do produto final. A compressão foi feita usando de uma prensa hidráulica com medidor de pressão. A célula de compactação foi projetada pelo Doutor Roberto Mattioli Silva e construída pela empresa Tomain Engenharia com uma adaptação no formato da construção em função dos recursos disponíveis.

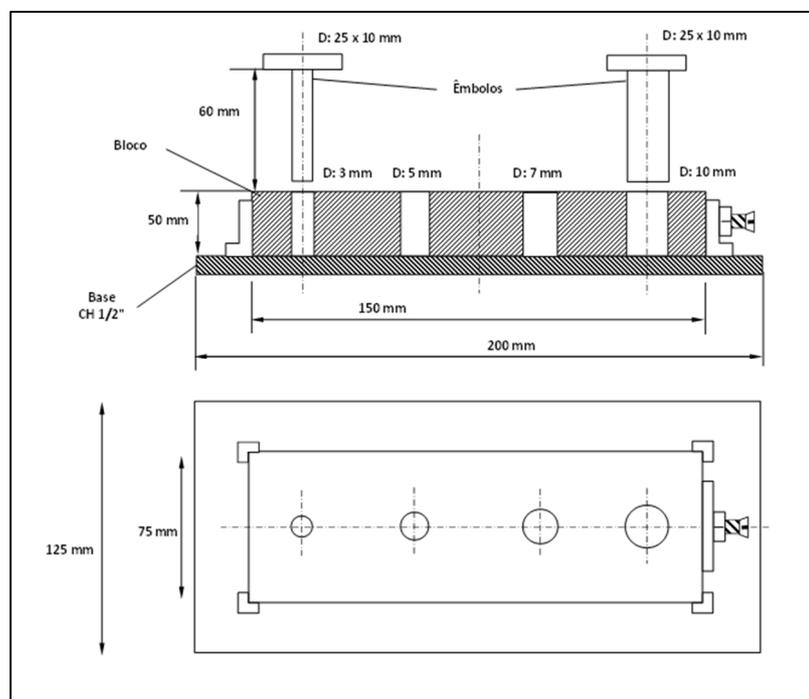


Figura 13 – Célula de compactação – Projetado por Roberto Mattioli Silva

As Figuras 14 e 15 consiste em uma imagem da célula de compactação e da prensa hidráulica utilizada na realização dos experimentos.



Figura 14 – Célula de compactação (vista lateral) – Fonte: O autor.



Figura 15 – Célula de compactação (vista superior) – Fonte: O autor.



Figura 16 – Prensa hidráulica – Fonte: O autor.

5.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

5.2.1 Descrição dos experimentos

A formulação escolhida foi o NPK 14.02.14 conforme descrito em 5.1.2 e suas respectivas matérias primas. Os experimentos foram divididos em três etapas conforme o fluxograma do processo de obtenção das partículas compactadas apresentado na Figura 16.

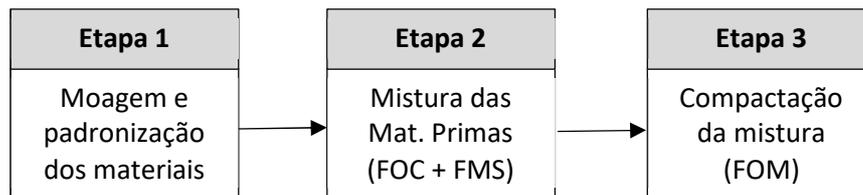


Figura 17 – Fluxograma do processo de compactação

A moagem das matérias primas (Etapa 1) foi realizada em moinho de facas até as granulometrias definidas no planejamento. Após a moagem a mistura das matérias primas foram realizadas em um misturador de pás até sua homogeneização (Etapa 2) e posterior compactação na célula de bancada apresentada em 5.1.4 (Etapa 3). Finalizado o experimento, uma alíquota era destinada para avaliação quanto à requisitos técnicos e de qualidade de natureza física (distribuição granulométrica e dureza).



Figura 18 – Moinho de facas – Fonte: O autor.

5.2.2 Planejamento experimental

Como forma de quantificar a eficácia da compactação, foi escolhido as análises de dureza e granulométrica. As matérias primas foram moídas em duas granulometrias distintas gerando duas amostras, assim a amostra A foi definida como aquela cuja as partículas passaram 100% pela malha 0,5 mm e o diâmetro médio D_A determinado em 0,17 mm. A amostra B como aquela cujas partículas passaram 100% pela malha 0,15 mm, o diâmetro médio D_B determinado em 0,13 mm. Cada uma das duas amostras, foram submetidas a pressão mínima de 15.000 kgf/cm² e 30.000 kgf/cm².

5.2.2.1 Caracterização física das misturas

AMOSTRA		Mistura moída < # 0,50 mm (A)	Mistura moída < # 0,15 mm (B)
Peneira (ABNT)	Abertura (mm)	Fração retida acumulada	Fração retida acumulada
#035	0,500	0,0	0,0
#050	0,300	11,5	0,0
#070	0,212	23,5	0,0
#100	0,150	63,5	0,0
#150	0,106	73,5	43,0
#200	0,075	86,5	69,0
#325	0,045	97,0	87,0
FUNDO	-	100,0	100,0
SGN	mm	0,17	0,13

Tabela 1 – Distribuição granulométrica das misturas moída

O SGN das partículas foi calculado conforme a Equação (5)

$$SGN = \frac{(P_2 - 50) * (D_2 - D_1)}{(P_2 - P_1)} + D_1 \quad \text{Equação (5)}$$

Amostra A: P1 = 23,5; P2 = 63,5; D1 = 0,150; D2 = 0,212

$$SGN = \frac{(63,5 - 50) * (0,212 - 0,150)}{(63,5 - 23,5)} + 0,150 = 0,17$$

Amostra B: P1 = 43; P2 = 69; D1 = 0,075; D2 = 0,150

$$SGN = \frac{(69 - 50) * (0,150 - 0,075)}{(69 - 43)} + 0,075 = 0,13$$

5.2.3 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica foi feita utilizando-se os dados obtidos pela técnica do peneiramento, no laboratório Labfert Análises na unidade de Uberaba, a partir dessa curva granulométrica foi possível obter o SGN (*Size Guide Number*) Tamanho Padrão da Partícula e o IU (*Uniformity Index*) Índice de Uniformidade das amostras de cada matéria prima, da mistura farelada convencional e do produto compactado, além do GSI (*Granulometric Spread Index*) Índice de Dispersão de Partículas.

5.2.4 Análise de Dureza

As análises de dureza foram realizadas, no laboratório Labfert Análises na unidade de Uberaba utilizando-se um durômetro da marca Ethik, Modelo DGP 298. Para as análises de dureza, foram utilizando 30 grânulos selecionados entre as malhas 2,36 mm e 2,80 mm, para obtenção da média, no qual os “*out layers*” eram descartados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Foram realizados quatro experimentos na célula de compactação para avaliação do compactado, as variáveis testadas nesses experimentos foram a distribuição granulométrica do pó alimentado e a pressão exercida sobre o mesmo, sem levar em consideração o tempo na operação. Os resultados são mostrados no decorrer deste capítulo.

Devido a limitação de produção dos compactados pelo procedimento adotado, não foi possível obter amostras maiores, desse modo prejudicando a análise do rendimento de produção e taxa de reciclo.

6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A COMPACTAÇÃO

6.2.1 Análise granulométrica

A produção dos compactados foi feita de forma individual e com tamanho padronizado, esse fato impossibilitou a expressão de uma curva granulométrica para a amostra do compactado, no entanto isso não comprometeu o trabalho porque na produção continua o material é selecionado por peneiramento, padronizando o mesmo em uma faixa granulométrica.

Com os resultados das análises granulométricas da mistura farelada convencional (Farelado) e do produto compactado (Compactado), o aumento do tamanho de partícula faz com que o produto obtido possa ser utilizado em culturas de cereais, onde os implementos agrícolas estão preparados para trabalhar com grânulos e a aplicação é realizada no sulco e não a lanço. Esse aumento é visto através do SGN (*Size Guide Number*) Tamanho Padrão da Partícula que foi de 0,85 mm para 4,08 mm.

Outro ponto importante é a seleção por peneiramento que pode padronizar o tamanho dos grânulos e assim ter uma uniformidade na aplicação, essa uniformidade é determinada pelo IU (*Uniformity Index*) Índice de Uniformidade. Para a mistura farelada que leva material farelado e granulado praticamente essa uniformidade não existe, já no material compactado ela é próxima de 75%.

Peneira (ABNT)	Abertura (mm)	Farelado	Compactado
		Fração retida acumulada	Fração retida acumulada
#004	4,80	4,9	0,0
#006	3,36	11,1	100,0
#007	2,80	13,8	100,0
#009	2,00	30,4	100,0
#012	1,41	36,8	100,0
#016	1,00	44,3	100,0
#032	0,50	63,3	100,0
FUNDO	-	100,0	100,0
SGN	mm	0,85	4,08
IU	%	2	74
GSI	-	163	12

Tabela 2 – Distribuição granulométrica

Outro fator importante é o GSI (*Granulometric Spread Index*) Índice de Dispersão de Partículas, que quantifica a tendência à segregação que é calculado pela Equação (6):

$$GSI = \frac{(D_{84} - D_{16})}{2 * D_{50}} \times 100 \quad \text{Equação (6)}$$

O GSI ajuda a entender o quão homogêneo ou heterogêneo é o tamanho das partículas em uma amostra. Quanto maior o índice, mais espalhados estão os tamanhos das partículas, indicando uma maior variedade de tamanhos. Já um índice menor indica uma distribuição mais uniforme, com partículas de tamanhos mais semelhantes.

A legislação brasileira no “MANUAL DE MÉTODOS ANALÍTICOS OFICIAIS DE FERTILIZANTES, CORRETIVOS, SUBSTRATOS, CONDICIONADORES E REMINERALIZADORES DE SOLO (2024), traz no item B do capítulo I uma tabela de interpretação do GSI.

Valor de GSI	Interpretação
Até 20	Baixa segregação: indica que o produto tem alta uniformidade de aplicação.
Maior que 20 até 25	Média segregação: indica que o produto tem média uniformidade de aplicação.
Maior que 25	Alta segregação: indica que o produto tem baixa uniformidade de aplicação.

Quadro 4 – Tabela de interpretação do GSI – MAPA, 2024

A mistura farelada convencional apresentou um GSI de 163, maior que 25, apresentando alto índice de segregação, enquanto o produto compactado apresentou um GSI de 12 o que indica baixa tendência a segregação.

6.2.2 Análise de Dureza

A pressão utilizada na produção dos compactados foi bem superior a pressão indicada na literatura (35 a 1.400 kgf/cm²) para fertilizantes minerais conforme o Quadro 2, para obtenção de grânulos com dureza superior a 2,5 kgf/grânulo.

Experimentos mostram que grânulos com dureza abaixo de 1,5 kgf/grânulo tende a se quebrar durante o armazenamento, valores entre 1,5 e 2,5 kgf/grânulo são aceitáveis, necessitando cuidados durante o manuseio e grânulos com dureza superior a 2,5 kgf/grânulo é altamente resistente (IFDC, 1979).

	AMOSTRA			
	C1	C2	D1	D2
Pressão, kgf/cm²	15.000	30.000	15.000	30.000
Top size, mm	0,50	0,50	0,15	0,15
Dureza, kgf/grânulo	2,83	2,92	3,02	2,93
Desvio médio, kgf/grânulo	0,66	0,72	0,64	0,65
Maior, kgf/grânulo	4,00	4,30	4,10	4,10
Menor, kgf/grânulo	1,80	1,70	1,80	1,60

Tabela 3 – Dureza média dos grânulos

Com base nos resultados o aumento da aplicação de pressão de 15.000 kgf/cm² para 30.000 kgf/cm² representou muito pouco ganho de dureza dos grânulos, assim como a moagem do material, esses dois fatores são importantes para a produção industrial, porque a finura do material pode exigir mais pressão de compressão. A umidade do pó alimentado foi a mesma em todas as compactações 4,1 %.

6.2.3 Concentração dos nutrientes

O produto compactado apresentou uma maior uniformidade na concentração dos nutrientes, e como todos estão no mesmo grânulo o risco de segregação dos nutrientes na aplicação é minimizado. Além do produto ter uma umidade bem menor do que o produto farelado convencional.

Nutrientes	Garantias	Farelado	Compactado
N total, %	14	12,8	13,9
P₂O₅ CNA+Água, %	2	2,3	2,1
K₂O, %	14	14,3	14,1
Soma NPK, %	30	29,4	30,1
	100	98,0	100,3
Carbono Orgânico, %	10	13,5	12,0
Umidade máxima, %	20	8,9	4,1

Tabela 4 – Análise química dos nutrientes garantidos

6.2.4 Compactador de rolos

Com os dados obtidos através dos testes na célula de compactação (Figura 13), foi projetado um equipamento piloto (Figura 18) na escala de uma planta industrial para realização de testes com amostras em quantidades maiores de material, experimentação de aditivos, e condições operacionais em regime contínuo.

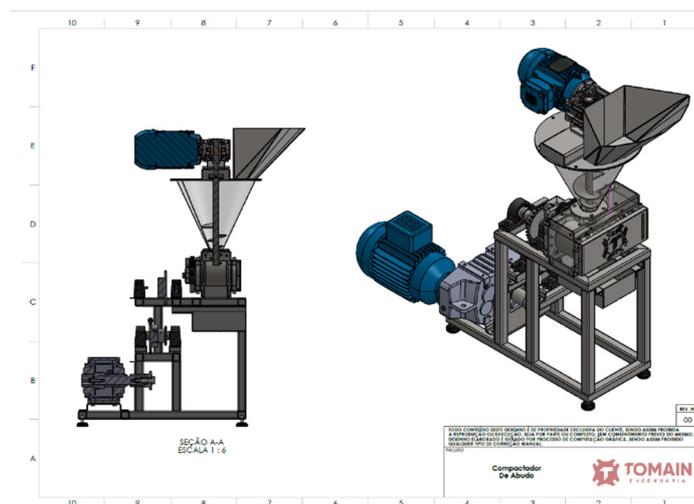


Figura 19 – Projeto da unidade piloto – Autor: Tomain Engenharia e Margato Consultoria

7 CONCLUSÕES E POSSÍVEIS DESDOBRAMENTOS

Os resultados da presente dissertação demonstraram que há viabilidade técnica na utilização da etapa de compactação na fabricação de fertilizante organomineral granulado. Mesmo que os parâmetros utilizados para a determinação da pressão de compactação encontrem fundamentação na literatura, os experimentos em bancada mostraram que há necessidade de aplicação de uma pressão mais alta que a especificada.

A exploração bem sucedida de uma rota de processamento industrial requer o cumprimento de etapas essenciais a fim de minimizar os riscos, sobretudo aqueles de transposição de escala. Do ponto de vista de desenvolvimento, e considerando ganhos potenciais de tempo, é oportuno considerar uma planta piloto, com todas as operações unitárias envolvidas no processo (secagem, moagem, mistura, compactação e peneiramento), e como mostra a literatura, a taxa de alimentação do material pode influenciar no resultado da compactação.

Aditivos devem ser testados a fim de melhorar a fluidez do pó durante a alimentação, a permeabilidade do pó e também a formação das ligações permanentes. Compactações com aquecimento também merecem atenção em função da sensibilidade das matérias primas mineral como Ureia e o Fosfato Monoamônio (MAP) a temperaturas acima de 65°C.

O passo final e mais importante seria buscar a parceria de alguma empresa misturadora de fertilizantes organominerais NPK para a instalação de uma planta em escala piloto, a fim de gerar material para avaliar também a eficiência agronômica do produto obtido em testes de vasos e casa de vegetação avaliando a dissolução do mesmo no solo e a solubilização dos nutrientes.

REFERÊNCIAS

ARTYUKHOV, A.; VAKAL, S.; SHKOLA, V.; VAKAL, V.; YANOVSKA, A. **Obtaining of the Novel Organo-Mineral Fertilizers in Pan Granulators: Technological Fundamentals.** In: IVANOV, V.; PAVLENKO, I.; LIAPOSHCHENKO, O.; MACHADO, J.; EDL, M. (eds). *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_21. Acesso em: 11 out. 2024.

BENBOW, J.; BRIDGWATER, J. **Paste flow and extrusion.** Oxford University Press, 1993.

BORLAUG, N. E. **Feeding a world of 10 billion people: the TVA/IFDC legacy.** Tennessee Valley Authority; International Center for Soil Fertility and Agricultural Development, Muscle Shoals, AL USA, 2003.

BOUHIA, Y.; HAFIDI, M.; OUHDOUCH, Y.; et al. **Conversion of waste into organo-mineral fertilizers: current technological trends and prospects.** *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 21, p. 425–446, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11157-022-09619-y>. Acesso em: 11 out. 2024.

BRYAN, J.E.; **Design and Optimization of Granulation and Compaction Processes for Enhanced Product Performance,** E&G Associates, Nashville, Tennessee, 2006.

CARVALHO, F. M. C. **A segregação de partículas no contexto das misturadoras de fertilizantes UNIUBE.** Uberaba, 2018.

ISHERWOOD, K. F., **Fertilizer Use and the Environment.** Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA). 2000.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Organominerais.** 5. ed. Piracicaba: Editora Degaspari, 2013.

LI, Y.; SHEN, Q.; AN, X.; XIE, Y.; LIU, X.; LIAN, B. **Organomineral fertilizer application enhances *Perilla frutescens* nutritional quality and rhizosphere microbial community stability in karst mountain soils.** *Frontiers in Microbiology*, v. 13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1058067>. Acesso em: 15 mar. 2024.

MAGALHÃES, E. N.; SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S. **Produção de adubos organominerais de liberação lenta pelo processo de briquetagem.** *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 21: E2968, p. 1 - 8, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20232968>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, Instrução Normativa n° 61, 08 de julho de 2020. **Diário Oficial da União**, Brasília, Seção 1, 15 de julho de 2020.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, Decreto n° 4,954, 14 de janeiro de 2004. **Diário Oficial da União**, Brasília, Seção 1, 15 de janeiro de 2004.

PIETSCH, T. **Size enlargement by agglomeration.** Chichester, Wiley, 1992.

REVISTA CULTIVAR, **Como usar a “Lei do Mínimo” para racionalizar os investimentos com fertilizantes – Parte 1**, disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/como-usar-a-%22lei-do-minimo%22-para-racionalizar-os-investimentos-com-fertilizantes---parte-1>, acesso em 02 de outubro de 2024.

REVISTA CULTIVAR, **Fertilizantes especiais apresentam crescimento em 2023, conforme Abisolo.** **Cultivar Notícias, 2023**, disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/fertilizantes-especiais-apresentam-crescimento-em-2023-conforme-abisolo>, acesso em 14 de outubro. 2024.

SAKRABANI, R. **Opportunities and challenges organo-mineral fertiliser can play in enabling food security.** *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 8, p. 1-10, 2024. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1296351.

SKRYLNYK, E.; ARTEM'YEVA, K.; KOLPAKOV, Y. **Technological foundations for the production of organo-mineral fertilizers from leonardite.** *Bulletin of Agricultural Science*, no. 98, 2020. Available at: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202010-01>. Accessed on: 11 out. 2024.

UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION (2024). **World Population Prospects 2024: Summary of Results** (UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9).

VAKAL, S.; VAKAL, V.; ARTYUKHOV, A.; et al. **Granulated organo-mineral fertilizers: the process of formation and investigation of porous phosphate-diatomite shell.** *Applied Nanoscience*, v. 13, p. 5157–5164, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02718-w>. Acesso em: 11 out. 2024.