



INFLUÊNCIA DE IMPUREZAS NA HIGROSCOPICIDADE DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

Influence of Impurities on the hygroscopicity of phosphate Fertilizers

Influencia de las impurezas en la higroscopicidad de los fertilizantes fosfatados

Nilson José Fernandes^{1*}, **André Carlos Silva**², **Elenice Maria Schons Silva**³, **Davi Lucio Xavier**⁴, & **Kevin Braham Fernandes de Souza**⁵

^{1 2 3 4 5} Faculdade de Engenharia / Universidade Federal de Catalão

^{1*} nilsonfernandes@ufcat.edu.br ² ancarsil@ufcat.edu.br ³ eschons@ufcat.edu.br ⁴ davilucio@discente.ufcat.edu.br

⁵ kevimfernandes@discente.ufcat.edu.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 31.10.2026

Disponibilizado: 08.06.2026

PALAVRAS-CHAVE: Fertilizantes; superfosfato triplo; acidez residual; impurezas; higroscopicidade.

KEYWORDS: Fertilizers; triple superphosphate; residual acidity; impurities; hygroscopicity.

PALABRAS CLAVE: Fertilizantes; superfosfato triple; acidez residual; impurezas; higroscopicidad.

***Autor Correspondente:** Fernandes, N. J.

RESUMO

A crescente demanda por fertilizantes fosfatados reforça a necessidade de avaliar parâmetros físico-químicos que influenciam sua qualidade, especialmente a higroscopicidade, por impactar diretamente o armazenamento, o transporte e a aplicação agrícola. Este estudo investigou o efeito das impurezas ferro, alumínio e magnésio na higroscopicidade do superfosfato triplo granulado (GTSP). Para isso, foram realizados experimentos em bancada utilizando TSP com diferentes teores dessas impurezas, aplicando planejamento experimental composto central ortogonal ($\alpha = 1,41$). As amostras foram granuladas em prato granulador sob condições controladas e submetidas a ensaios de higroscopicidade em ambiente com 80% de umidade relativa por 24, 48 e 144 horas. A absorção de umidade variou entre 4% e 7%, valores suficientes para promover empedramento. Entre as impurezas, o ferro apresentou o maior impacto, seguido por alumínio e magnésio. No entanto, verificou-se que o principal fator associado ao aumento da higroscopicidade foi a elevação da acidez fosfórica residual, decorrente de menores índices de conversão nas reações de solubilização. Conclui-se que o controle da acidez residual é determinante para reduzir a higroscopicidade do GTSP, destacando-se a importância de práticas industriais como neutralização, melhoria do beneficiamento mineral e uso de aditivos antiumedecantes.

ABSTRACT

The growing demand for phosphate fertilizers highlights the need to assess physicochemical parameters that determine product quality, particularly hygroscopicity, which directly affects storage, transport, and agricultural application. This study evaluated the influence of iron, aluminum, and magnesium impurities on the hygroscopicity of granular triple superphosphate (GTSP).

Bench-scale experiments were performed using TSP with different impurity levels, following an orthogonal central composite design ($\alpha = 1.41$). Samples were granulated in a disc pelletizer under controlled conditions and subjected to hygroscopicity tests at 80% relative humidity for 24, 48, and 144 hours. Moisture uptake ranged from 4% to 7%, values sufficient to induce caking. Among the impurities, iron exhibited the greatest effect, followed by aluminum and magnesium. However, results showed that the key factor influencing hygroscopicity was the increase in residual phosphoric acidity, resulting from lower conversion rates during solubilization reactions. The study concludes that GTSP hygroscopicity is strongly linked to residual acidity control, emphasizing the relevance of industrial practices such as neutralization processes, improved mineral beneficiation, and the use of anti-caking additives.

RESUMEN

La creciente demanda de fertilizantes fosfatados resalta la importancia de evaluar parámetros fisicoquímicos que determinan su calidad, especialmente la higroscopicidad, debido a su impacto en el almacenamiento, el transporte y la aplicación agrícola. Este estudio analizó la influencia de las impurezas de hierro, aluminio y magnesio en la higroscopicidad del superfosfato triple granulado (GTSP). Se realizaron experimentos a escala de laboratorio empleando TSP con distintos niveles de impurezas, aplicando un diseño experimental compuesto central ortogonal ($\alpha = 1,41$). Las muestras fueron granuladas en un plato granulador bajo condiciones controladas y sometidas a ensayos de higroscopicidad en un ambiente con 80% de humedad relativa durante 24, 48 y 144 horas. La absorción de humedad varió entre 4% y 7%, valores suficientes para favorecer la formación de terrones. Entre las impurezas, el hierro mostró el mayor efecto, seguido del aluminio y el magnesio. Sin embargo, se observó que el factor determinante fue el aumento de la acidez fosfórica residual, consecuencia de menores índices de conversión en las reacciones de solubilización. Se concluye que la higroscopicidad del GTSP está estrechamente relacionada con el control de la acidez residual, destacándose la importancia de prácticas industriales como neutralización, mejoramiento del beneficio mineral y el uso de aditivos antihumedad.

INTRODUÇÃO

A agricultura moderna depende fortemente do uso de fertilizantes para atender à crescente demanda mundial por alimentos, impulsionada pelo crescimento populacional e pela

necessidade de maximização da produtividade agrícola (AMA, 2015). A importância da produção de fertilizantes também está relacionada com a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, o que incrementa ainda mais a demanda por insumos agrícolas (Costa & Silva, 2012). No Brasil, país que se destaca como um dos maiores produtores e exportadores agrícolas, o consumo de fertilizantes tem apresentado aumento contínuo nas últimas décadas (ANDA, 2010). Esse crescimento está associado não apenas à expansão da área cultivada, mas também à intensificação tecnológica no setor agrícola (AMA, 2015).

Entre os nutrientes essenciais às plantas, o fósforo (*P*) desempenha papel central na fotossíntese, no metabolismo energético e na síntese de ácidos nucleicos (Potafos, 2005). Apesar de sua relevância, o fósforo encontra-se na natureza predominantemente em formas insolúveis, como a fluorapatita ($Ca_5(PO_4)_3F$), exigindo processos químicos de solubilização para sua utilização na agricultura (Loureiro et al., 2008). A produção de fertilizantes fosfatados abarca diferentes rotas industriais, dentre elas se destacam a produção de ácido fosfórico (H_3PO_4) e de superfosfatos, em especial o superfosfato triplo granulado (GTSP).

O GTSP apresenta elevado teor de fósforo solúvel (declarado comercialmente como P_2O_5 solúvel), o que o torna um insumo de alta eficiência agronômica. Entretanto, sua qualidade está diretamente associada ao controle de parâmetros físico-químicos durante sua produção. Dentre os parâmetros químicos têm-se os teores de P_2O_5 solúvel e acidez residual (ácido fósforo não reagido que permanece no produto). Nos parâmetros físicos destaca-se a dureza e a higroscopicidade (propriedade dos materiais de absorverem umidade do ambiente). Este último é de particular importância, pois fertilizantes excessivamente higroscópicos apresentam maior tendência ao empedramento e à perda de fluidez, o que dificulta a aplicação mecanizada e reduz sua eficiência agrícola (Silva, 1994).

O insumo mineral consumido na cadeia de processamento do fostato (normalmente a fluorapatita) contém impurezas em sua composição. Dentre estas, destaca-se o ferro (*Fe*), alumínio (*Al*) e magnésio (*Mg*), que exercem forte influência na cadeia produtiva do GTSP, afetando desde a solubilização do fósforo até as propriedades finais do fertilizante. Neste contexto, este artigo tem como objetivo investigar a relação entre impurezas minerais presentes no TSP (insumo consumido na produção do GTSP) e a higroscopicidade no GTSP, apresentando resultados experimentais obtidos em bancada e discutindo suas implicações para a indústria de fertilizantes.

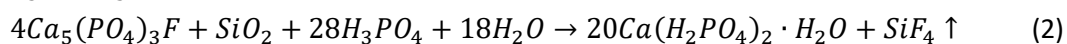
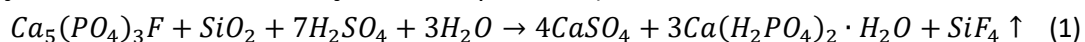
REFERENCIAL TEÓRICO

O fósforo (*P*) é o décimo elemento mais abundante na crosta terrestre e é indispensável para a manutenção da vida animal e vegetal (Loureiro et al., 2008). Seu ciclo natural é limitado pela baixa solubilidade dos minerais fosfáticos, o que explica a importância do processamento químico para a produção de fertilizantes (Silva, 1994).

Os fertilizantes fosfatados são produzidos principalmente a partir de concentrados de apatita (normalmente a fluorapatita), obtidos por lavra e beneficiamento de minérios sedimentares e ígneos. No Brasil, predominam jazidas de origem ígnea, localizadas em Minas Gerais e Goiás (CEF, 2010), embora mundialmente a predominância deste mineral é de origem sedimentar.

O processamento industrial envolve inicialmente a reação de solubilização fluorapatita com ácidos fortes, como o ácido sulfúrico e/ou o ácido fosfórico, resultando na formação de

produtos solúveis como o SSP (superfosfato simples) e o TSP (superfosfato triplo) (Equações 1 e 2 - reações envolvidas na formação desses produtos).



Portanto, o TSP é resultado da reação de solubilização do fosfato natural (na Eq. (1) representada pela molécula da fluorapatita: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) com o ácido fosfórico (H_3PO_4). Devido ambos os insumos conterem fósforo em sua composição, o TSP é caracterizado por apresentar elevados teores de fósforo solúvel.

Na etapa seguinte, o TSP, após um período de cura de 5 a 15 dias (necessário para a conclusão das reações químicas), é geralmente submetido ao processo de granulação (processo essencialmente físico), dando origem ao GTSP, que apresenta propriedades físicas superiores para o transporte e a aplicação agrícola. Importante destacar que, embora a granulação tenha sido descrita como um processo essencialmente físico, ela pode agregar reações complementares, como a de neutralização da acidez residual com outros insumos (ex.: cal, calcário, amônia), o qual aprimora as propriedades físicas do produto (GTSP).

Já a determinação da solubilidade do GTSP é normalmente realizada com base nas seguintes composições analíticas:

- Teor de P_2O_5 C.N.A. (MAPA, 2007): trata-se do resultado analítico do P_2O_5 solúvel em solução de citrato neutro de amônio e em água. Corresponde essencialmente ao P_2O_5 nas formas de fosfato bicálcico ($\text{Ca}(\text{HPO}_4)$), fosfato monocalcico ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) e acidez fosfórica (H_3PO_4), além de alguns sais complexos de fosfato com impurezas;
- Teor de P_2O_5 S.A. (MAPA, 2007): trata-se do resultado analítico do P_2O_5 solúvel em água. Corresponde essencialmente ao P_2O_5 na forma de fosfato monocalcico ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) e acidez fosfórica (H_3PO_4);
- Teor de P_2O_5 Acidez (norma ABNT NBR 5774): trata-se do resultado analítico do P_2O_5 na forma de ácido fosfórico (também chamada de acidez fosfórica residual).

Dentre entre estes parâmetros é importantes salientar que a presença de ácidos fortes na composição dos fertilizantes (Teor de P_2O_5 Acidez), impacta sobremodo em sua avidez do material por água. Assim, a higroscopicidade tem sua importância quanto aos aspectos que favorecem os fenômenos de empedramentos nos fertilizantes, ou seja, produtos mais higroscópicos possuem maior capacidade de absorver água do meio ambiente, o que favorece formação de pontes salinas, que provocam os fenômenos de empedramento.

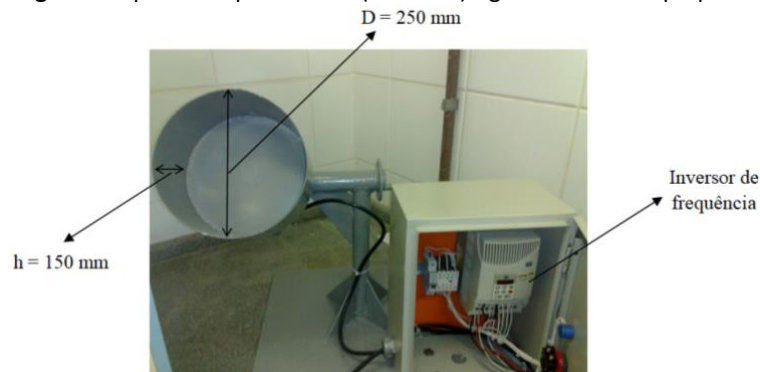
Na indústria de fertilizantes existem várias práticas que buscam reduzir os fenômenos de empedramento. Dentre às que tem relação com a redução da higroscopicidade podem-se ressaltar três: granulometria; acidez residual; e presença de impurezas (Sinden, 2010).

Diversos autores destacam que a presença de impurezas como *Fe*, *Al* e *Mg* altera a solubilidade do fósforo e favorece reações secundárias que aumentam a acidez residual no fertilizante (Silva, 1994). Esse efeito impacta diretamente a higroscopicidade, uma vez que a acidez residual atua como ponto ativo para a absorção de umidade. Oliveira et al. (2017) reforçam que, em testes de bancada, a variação dos teores dessas impurezas resultou em diferenças significativas na estabilidade física do GTSP. Assim, a compreensão dos efeitos das impurezas na higroscopicidade não apenas auxilia no aprimoramento dos processos industriais, mas também orienta a definição de especificações técnicas para fertilizantes fosfatados, garantindo maior eficiência agrícola e competitividade no mercado.

METODOLOGIA

O processo de granulação de fertilizantes é fortemente influenciado pela solubilidade das matérias-primas. Contudo, na prática industrial, esse parâmetro não é facilmente observado, uma vez que apresentam variações significativas em função da temperatura e da umidade durante a granulação, fatores que afetam diretamente a solubilidade do material. Assim, visando observar somente os efeitos da composição dos materiais na higroscopicidade do GTSP, a metodologia experimental baseou-se em estabelecer parâmetros de temperatura e umidade invariáveis para todos os experimentos. Referente a outros parâmetros físicos (granulação), buscou-se aproximar a granulação em bancada o máximo possível da granulação industrial. Já a granulação das amostras foi realizada em um granulador do tipo prato (bancada), com dimensões e características (Figura 1).

Figura 1. Aparato experimental (bancada) - granulador do tipo prato



Fonte: Autores.

A influência das impurezas na higroscopicidade do GTSP foi analisada através da variação das concentrações dos elementos ferro, alumínio e magnésio (determinados na forma de óxidos) presente no TSP (insumo do GTSP). Os teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e MgO foram as variáveis independentes, que foram codificadas em números adimensionais (Fe^* , Al^* e Mg^*) (Equações 3, 4 e 5).

$$Fe^* = \frac{\%Fe_2O_3 - 1,70\%}{0,22\%} \quad (3)$$

$$Al^* = \frac{\%Al_2O_3 - 0,31\%}{0,24\%} \quad (4)$$

$$Mg^* = \frac{\%MgO - 0,40\%}{0,16\%} \quad (5)$$

Os experimentos foram conduzidos em duplicata, com base em um planejamento experimental do tipo composto central ortogonal ($\alpha = 1,41$), incluindo quatro réplicas no ponto central (Tabela 1).

Tabela 1. Composição do TSP nos testes com GTSP ($\alpha = 1,41$)

Experimento	Fe_2O_3	Fe^*	Al_2O_3	Al^*	MgO	Mg^*
1	1,48%	-1	0,37%	-1	0,24%	-1
2	1,93%	1	0,37%	-1	0,24%	-1
3	1,48%	-1	0,85%	1	0,24%	-1
4	1,93%	1	0,85%	1	0,24%	-1
5	1,48%	-1	0,37%	-1	0,56%	1
6	1,93%	1	0,37%	-1	0,56%	1
7	1,48%	-1	0,85%	1	0,56%	1
8	1,93%	1	0,85%	1	0,56%	1
9	1,70%	0	0,61%	0	0,18%	- α
10	1,70%	0	0,61%	0	0,62%	+ α
11	1,70%	0	0,32%	- α	0,40%	0
12	1,70%	0	0,94%	+ α	0,40%	0
13	1,39%	- α	0,61%	0	0,40%	0
14	2,02%	+ α	0,61%	0	0,40%	0
15	1,70%	0	0,61%	0	0,40%	0

16	1,70%	0	0,61%	0	0,40%	0
17	1,70%	0	0,61%	0	0,40%	0
18	1,70%	0	0,61%	0	0,40%	0

Fonte: Autores.

O processo experimental foi organizado em três etapas principais, designadas como A, B e C, as quais são descritas a seguir:

A. Preparação do TSP

O TSP foi inicialmente desagregado com auxílio de espátula, evitando-se os possíveis efeitos tixotrópicos (material se tornar pegajoso). Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 105 °C por 2 horas. Após esse processo, o material foi peneirado em malha de 0,425 mm ($D_{50} \approx 0,32$ mm) e fracionado em alíquotas de 150 g. Os recipientes contendo o TSP classificado (< 0,425 mm) e com umidade inferior a 1% foram mantidos em estufa a 65 °C por mais de 24 horas, até atingir equilíbrio térmico. Nessas condições, todas as amostras apresentaram umidade e temperatura uniformes, garantindo a padronização para os experimentos.

B. Granulação das amostras

Na granulação industrial geralmente usa-se vapor e água aquecida para granular o TSP. Entretanto, nos testes em bancada, a dificuldade de se monitorar a quantidade de vapor aplicada geraria variabilidade nos experimentos. Por esse motivo, optou-se por empregar exclusivamente água fervente (100 °C) como fase líquida de granulação. Testes preliminares identificaram os parâmetros ótimos de operação:

- Fase líquida = 15% (27 g de água fervente para 150 g de sólido);
- Inclinação do prato granulador = 65°;
- Tempo de granulação = 2 min;
- Rotação do prato granulador = 24 rpm.

Os testes também demonstraram a necessidade de adaptações no equipamento, como a instalação de um raspador na parte superior do leito de granulação (para evitar a aderência de partículas úmidas às paredes do granulador) e de aletas nas paredes internas do prato (reduzir o escorregamento de partículas secas no início da operação).

Para cada ensaio, alíquotas de 150 g de TSP foram retiradas da estufa e imediatamente transferidas ao prato granulador, já ajustado quanto à inclinação e rotação. Após cerca de 5 segundos, o material encontrava-se homogêneo, momento em que se iniciou a adição da água fervente. Essa etapa foi realizada com auxílio de seringa de agulha fina (0,38 mm), permitindo a aplicação uniforme da fase líquida sobre a base do leito. A dosagem completa da água levou aproximadamente 30 segundos, a partir dos quais se iniciou a contagem do tempo de granulação (Figura 2).

Figura 2. Operação do granulador em bancada - granulação GTSP



Fonte: Autores.

Os ensaios de granulação foram conduzidos sempre de forma padronizada, seguindo as condições controladas estabelecidas nos testes preliminares.

C. Determinação da higroscopicidade do GTSP

A análise da higroscopicidade do GTSP seguiu a metodologia descrita por Alcarde et al. (1992). As amostras foram inicialmente secas em estufa a 105 °C por 24 horas e, após resfriamento em dessecadores, pesadas em balança analítica com precisão de 10^{-4} g. Em seguida, foram expostas a um ambiente com umidade relativa controlada de 80%. Novas pesagens foram realizadas após 24, 48 e 144 horas de exposição, permitindo determinar o aumento de massa correspondente à umidade livre (U_g) absorvida pelos grãos, indicador dos efeitos de higroscopicidade do GTSP.

RESULTADOS

Os resultados experimentais demonstraram que a higroscopicidade do GTSP aumenta significativamente com o aumento do teor de impurezas presentes no TSP. A umidade livre do GTSP apresenta relação inequívoca com a presença de ferro, alumínio e magnésio nas amostras (Tabela 2).

Tabela 2. Teores de umidade livre (U_g) no GTSP ($\alpha = 1,41$)

Experimento	Fe^*	Al^*	Mg^*	U_g (24 horas)	U_g (48 horas)	U_g (144 horas)
1	-1	-1	-1	3,1%	4,1%	5,6%
2	1	-1	-1	3,4%	4,6%	6,1%
3	-1	1	-1	4,0%	5,4%	6,1%
4	1	1	-1	4,4%	5,8%	7,7%
5	-1	-1	1	3,9%	5,5%	6,3%
6	1	-1	1	4,2%	5,8%	7,4%
7	-1	1	1	4,6%	6,0%	7,2%
8	1	1	1	5,3%	6,5%	8,5%
9	0	0	-1,41	3,4%	5,0%	5,8%
10	0	0	1,41	4,1%	5,5%	6,5%
11	0	-1,41	0	3,4%	5,0%	5,6%
12	0	1,41	0	4,7%	6,1%	6,2%
13	-1,41	0	0	4,0%	5,2%	5,3%
14	1,41	0	0	4,5%	6,4%	6,7%
15	0	0	0	4,1%	5,6%	6,8%
16	0	0	0	4,0%	5,3%	6,5%
17	0	0	0	4,3%	5,7%	7,2%
18	0	0	0	4,2%	5,5%	6,6%

Fonte: Autores.

A partir dos resultados da Tab. (2), foram ajustadas as equações que descrevem o aumento de umidade do GTSP (higroscopicidade) em função das variáveis adimensionais de concentração de ferro, alumínio e magnésio (Fe^* , Al^* e Mg^*) presentes no TSP utilizado nos experimentos. Estes ajustes, representadas respectivamente pelas Equações 6, 7 e 8, que

apresentaram coeficientes de correlação quadrática (R^2) de 0,9560, 0,9081 e 0,6770, com resíduos distribuídos de forma aleatória e independente.

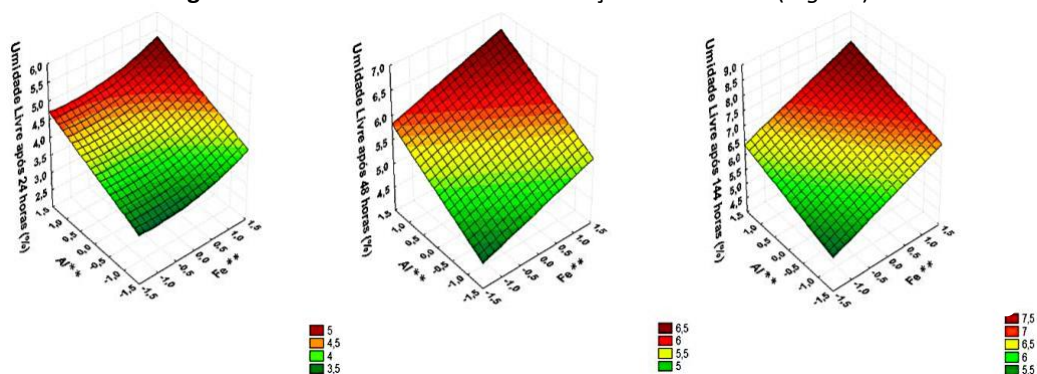
$$U_{g\ 24h}(\%) = 4,11 + 0,20 \cdot Fe^* + 0,10 \cdot (Fe^*)^2 + 0,45 \cdot Al^* + 0,36 \cdot Mg^* - 0,14 \cdot (Mg^*)^2 \quad (6)$$

$$U_{g\ 48h}(\%) = 5,59 + 0,28 \cdot Fe^* + 0,43 \cdot Al^* + 0,38 \cdot Mg^* - 0,15 \cdot (Mg^*)^2 - 0,17 \cdot Al^* \cdot Mg^* \quad (7)$$

$$U_{g\ 144h}(\%) = 6,56 + 0,55 \cdot Fe^* + 0,40 \cdot Fe^* + 0,41 \cdot Mg^* \quad (8)$$

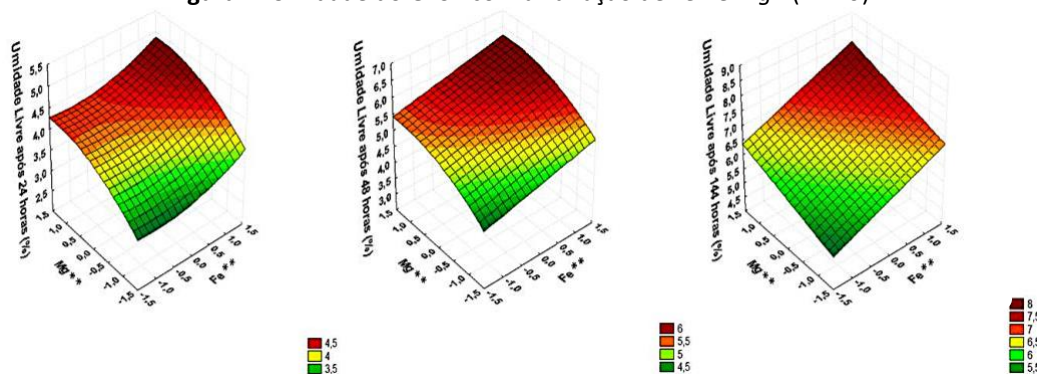
Já as Figuras 3, 4 e 5 ilustram respectivamente as superfícies de resposta do aumento de umidade das amostras, após 24, 48 e 144 horas de exposição em ambiente com umidade relativa de 80%, em função da variação das concentrações de impurezas Fe^* , Al^* e Mg^* (variáveis codificadas) presentes no TSP.

Figura 3. Umidade do GTSP com a variação de Fe^* e Al^* ($Mg^*=0$)



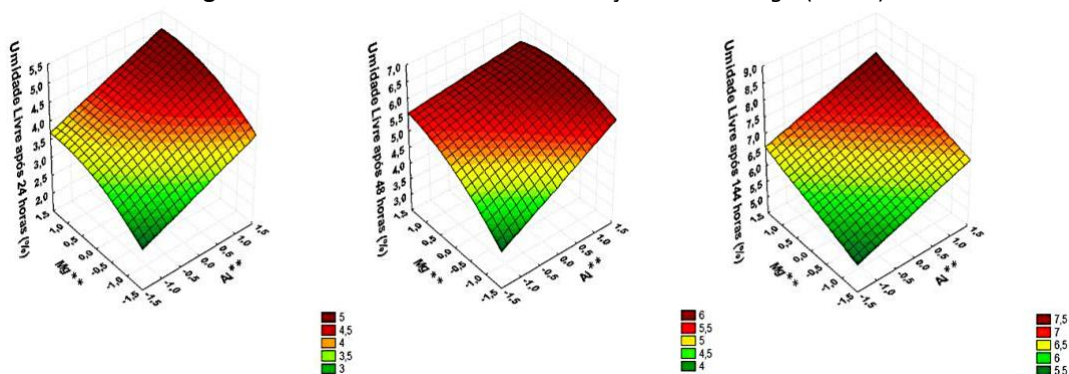
Fonte: Autores.

Figura 4. Umidade do GTSP com a variação de Fe^* e Mg^* ($Al^*=0$)



Fonte: Autores.

Figura 5. Umidade do GTSP com a variação de Al^* e Mg^* ($Fe^*=0$)



Fonte: Autores.

O ferro foi identificado como a impureza de maior impacto, promovendo aumentos expressivos na absorção de umidade. Esse efeito pode ser atribuído à formação de sais de ferro solúveis que intensificam a retenção de água nas superfícies dos grânulos. O alumínio

apresentou efeito intermediário, enquanto o magnésio mostrou impacto relativamente menor, embora também significativo.

As superfícies de resposta apresentaram, em geral, perfis não lineares, exceto nos experimentos com 144 horas de exposição (para todas as variáveis). A maior linearidade observada nesse período está provavelmente associada à estabilização do processo de absorção de água, indicando a condição de equilíbrio higroscópico.

Não obstante, em uma análise mais ampla, é pouco razoável afirmar que os teores de impurezas impactam diretamente a higroscopicidade do GTSP. É mais plausível correlacionar esse efeito com os níveis de acidez fosfórica residual: quanto maior o teor de acidez residual, maior a capacidade do fertilizante de absorver umidade. Em outras palavras, os maiores aumentos nos teores de umidade (higroscopicidade) ocorreram nas condições em que se observaram concentrações mais elevadas de impurezas, que resultaram em menores índices de conversão nas reações de solubilização e, conseqüentemente, em maiores teores de acidez fosfórica residual.

Os resultados também mostraram que os incrementos de umidade após a exposição do GTSP a uma umidade relativa de 80% variaram entre 4 e 7%, valores suficientemente significativos para favorecer o empedramento do produto. Esses achados reforçam a relevância do processo de neutralização da acidez fosfórica residual no GTSP, bem como a necessidade de acondicionamento adequado dos fertilizantes granulados antes da aplicação, considerando-se os potenciais aumentos de umidade livre observados.

Portanto, o controle da composição mineralógica do concentrado fosfático, aliado a estratégias industriais que visem minimizar a acidez residual no TSP, é fundamental para reduzir os efeitos adversos da higroscopicidade. Entre as alternativas possíveis destacam-se o aprimoramento dos processos de beneficiamento mineral, a otimização das condições de reação de acidulação e o desenvolvimento de aditivos antiumectantes aplicados ao produto.

CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que as impurezas ferro, alumínio e magnésio influenciam de maneira significativa a higroscopicidade do superfosfato triplo granulado (GTSP), mesmo que de forma indireta. O aumento da acidez fosfórica residual, diretamente associado à presença dessas impurezas, resultou em maior absorção de umidade pelo fertilizante (entre 4 e 7%), comprometendo sua estabilidade física e operacional.

O ferro apresentou o efeito mais pronunciado, seguido pelo alumínio e pelo magnésio. Esses resultados confirmam a necessidade de controle rigoroso da composição mineralógica do concentrado fosfático e da acidez residual do TSP. Medidas industriais voltadas ao aprimoramento do beneficiamento do produto e ao desenvolvimento de aditivos antiumectantes podem contribuir para reduzir a susceptibilidade do GTSP ao empedramento.

Sob a ótica da Engenharia de Produção, este estudo reforça a importância da integração entre o controle de processo e a gestão da qualidade na indústria de fertilizantes, especialmente no que diz respeito à padronização de matérias-primas e à otimização de parâmetros operacionais. A compreensão dos efeitos das impurezas sobre as propriedades físico-químicas do produto final oferece subsídios para o planejamento de processos mais eficientes, sustentáveis e economicamente competitivos.

Sugere-se a continuidade de pesquisas que integrem os estudos de higroscopicidade com outros parâmetros físico-químicos, como solubilidade, dureza e ação de aditivos antiumectantes, de modo a permitir uma análise mais abrangente da qualidade dos fertilizantes fosfatados e a consolidação de práticas produtivas que unam desempenho técnico e eficiência industrial.

REFERÊNCIAS

Alcarde, J. C., Malavolta, E., Borges, A. L., Muniz, A. S., Veloso, C. A., Fabrício, A. C., & Viegas, I. de J. M. (1992). Avaliação da higroscopicidade de fertilizantes e corretivos. *Scientia Agricola*, 137-144. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161992000400018>

Associação dos Misturadores de Adubo do Brasil. AMA. (2015). *Associação Brasileira do Agronegócio: relatórios técnicos*. AMA.

Associação Nacional para Difusão de Adubos. ANDA. (2010). *Phosphate fertilizers in Brazil: fertilizantes fosfatados Brasil*. Uberlândia, MG: [s.n.]

Centro de Excelência em Fertilizantes. CEF. (2010). Workshop sobre tecnologias de produção de fertilizantes: *apresentação*. Uberlândia, MG: [s.n.]

Costa, L. M. & Silva, M. F. O. (2012). A indústria química e o setor de fertilizantes. BNDES 60 anos: perspectivas setoriais, (12-60). Rio de Janeiro: *Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social*. Recuperado de <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2025/1/A%20ind%C3%BAria%20qu%C3%ADmica%20e%20o%20setor%20de%20fertilizantes%20antes%20de%20P%20A.pdf>

Loureiro, F. E. L., Monte, M. B. M., & Marisa, N. (2008). Agrominerais-Fosfato. In: Luz, A. B. &

Lins, F. A. F. (Orgs.). Rochas e minerais industriais: usos e especificações. Capítulo 7: Rio de Janeiro: CETEM/MTC. Recuperado de <https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. (2017). Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos (240p.). MAPA. Recuperado de <https://www.gov.br/agricultura/pt-br>

Oliveira, N. F., Fernandes, N. J., & Guimarães, R. R. S. (2017). Influências de impurezas no fator de granulação. *Anais do Simpósio de Engenharia de Produção, UFG, Catalão, GO*. Recuperado de https://files.cercomp.ufg.br/webv/up/1012/o/R_AFAEL_ROSA_DA_SILVA_GUIMARAES.pdf

Potafos. (2005). Arquivo Agrônomo nº 10: Nutri-fatos (24p.). POTAFOS. Recuperado de <http://www.ppi.pplic.org>

Silva, R. M. (1994). Minerais associados às apatitas: Análise de sua influência na produção de ácido fosfórico e fertilizantes fosfatados (Dissertação de Mestrado). *Universidade de São Paulo (USP)*. Recuperado de <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-24062024-114004/pt-br.html>

Sinden, J. (2010). *Workshop sobre tecnologia de produção de fertilizantes: artigos fertilizantes*. Uberlândia, MG: [s.n.]