



**UNIVERSIDADE DE UBERABA**

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO**

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

**ANTÔNIO ALEXANDRE CONESSA**

**ESTUDO DO PROCESSO DE ACIDULAÇÃO NA PRODUÇÃO DE  
SUPERFOSFATO SIMPLES COM USO DE CALCÁRIO COMO  
AGENTE INERTE**

**UBERABA-MG  
2026**



ANTÔNIO ALEXANDRE CONESSA

**ESTUDO DO PROCESSO DE ACIDULAÇÃO NA PRODUÇÃO DE  
SUPERFOSFATO SIMPLES COM USO DE CALCÁRIO COMO  
AGENTE INERTE**

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

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químico Agroindustriais.

Orientador: Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima

Coorientador: Dr. André Luís Teixeira Fernandes

UBERABA-MG  
2026

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

C758e Conessa, Antônio Alexandre.  
Estudo do processo de acidulação na produção de superfosfato simples com uso de calcário como agente inerte / Antônio Alexandre Conessa. – Uberaba (MG), 2026.  
75 f. : il., color.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.  
Orientador: Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima.  
Coorientador: Prof. Dr. André Luís Teixeira Fernandes.

1. Fertilizantes fosfatados. 2. Calcário. 3. Fósforo. 4. Eficiência industrial. I. Lima, Euclides Antônio Pereira de. II. Fernandes, André Luís Teixeira. III. Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 631.85

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

ANTÔNIO ALEXANDRE CONESSA


ESTUDO DO PROCESSO DE ACIDULAÇÃO NA PRODUÇÃO DE  
SUPERFOSFATO SIMPLES COM USO DE CALCÁRIO COMO AGENTE  
INERTE

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

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químico Agroindustriais.


Aprovado em: 13/03/2026

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente  
 EUCLIDES ANTONIO PEREIRA DE LIMA  
Data: 16/03/2026 17:48:26-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


---

Prof(a). Dr(a). Euclides Antônio Pereira de Lima – Orientador(a)  
Universidade de Uberaba

Documento assinado digitalmente  
 LEONARDO CAMPOS DE ASSIS  
Data: 29/04/2026 12:08:08-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof(a). Dr(a). Leonardo Campos de Assis  
Universidade de Uberaba

Documento assinado digitalmente  
 DEUSMAQUE CARNEIRO FERREIRA  
Data: 16/03/2026 18:54:13-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof(a). Dr(a). Deusmaque Carneiro Ferreira  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dedico este trabalho a todos que caminharam comigo, sustentaram meus passos nos momentos difíceis e celebraram cada pequena vitória, tornando possível escrever mais um capítulo de coragem, perseverança e propósito no livro da vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, fonte suprema de sabedoria, força e propósito, por ter me sustentado em cada etapa desta jornada. Nos momentos de incerteza, foi Ele quem renovou minha esperança; nos períodos de cansaço, foi Ele quem fortaleceu meu ânimo. Como está escrito: *“Tudo posso naquele que me fortalece”* (Filipenses 4:13). Reconheço que esta conquista é, antes de tudo, expressão da graça, da misericórdia e do cuidado de Deus sobre minha vida.

Aos meus amigos de empresa, manifesto minha sincera gratidão pela parceria constante, pelos desafios compartilhados e pelo apoio incondicional. A convivência diária, a troca de experiências e o espírito de cooperação foram fundamentais para meu crescimento profissional e humano.

Aos professores do Programa de Mestrado, agradeço pela excelência no ensino, pela dedicação à formação científica e pelo incentivo permanente ao pensamento crítico, elementos essenciais para a consolidação deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima, ao coorientador, Prof. Dr. André Luís Teixeira Fernandes, e aos membros da banca de qualificação e defesa, Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis, Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira, expresse minha profunda gratidão pela confiança depositada, pelas orientações seguras, pelo rigor científico.

À minha esposa, Ivanda Nivaldete Vieira da Cruz Conessa, meu reconhecimento mais especial. Obrigado pelo amor incondicional, pela paciência nos momentos de ausência, pelo incentivo constante e pela força silenciosa que me sustentou ao longo de todo este percurso. À sua família, agradeço o acolhimento, apoio e palavras de encorajamento que tornaram esta caminhada mais leve.

Aos meus pais, Orides Conessa e Maria Lúcia Pires, que hoje não estão fisicamente presentes, mas permanecem vivos em minha memória e em meus valores, dedico minha eterna gratidão. Foram eles que me ensinaram o valor do trabalho, da honestidade e da perseverança. Esta vitória também lhes pertence, pois tudo o que sou carrega a marca do que me ensinaram.

Que esta conquista seja honra e glória a Deus e o resultado do amor, do apoio e da confiança de todos que caminharam comigo ao longo desta trajetória.

## RESUMO

A produção de superfosfato simples (SSP) apresenta como um de seus principais desafios o tempo de cura, o qual impacta diretamente a eficiência operacional, os custos e a produtividade industrial. Nesse contexto, este estudo propõe uma abordagem tecnicamente simples a adição controlada de calcário durante o processo de acidulação, com o objetivo de acelerar a cinética da reação e melhorar o processo produtivo. Foram realizados ensaios em escala de bancada e em batelada, sem adições de calcário (amostra branca), e com adições controladas de 3%, 5% e 7% de calcário, avaliando-se a conversão de  $P_2O_5$  (CNA/ $P_2O_5$  total), acidez residual e umidade ao longo do período de cura. Os resultados evidenciaram ganhos significativos de desempenho com a adição de calcário. Com 5 dias de cura, as formulações com 3% e 5% já apresentaram maior conversão em relação à amostra branca, com valores de 86,64% e 87,22%, respectivamente, enquanto o branco atingiu 83,96%. No 9º dia, as formulações com calcário alcançaram conversões de 91,97% (3%) e 91,46% (5%), superiores ao branco (85,62%). Além disso, observou-se redução nos teores de acidez residual e umidade nas formulações com calcário, indicando maior avanço da reação e melhor estabilização do sistema. Em relação a acidez, no 5 dia, a amostra branca apresentou maior acidez e umidade (19,29% e 4,66%), enquanto as formulações com 3% e 5% de calcário apresentaram, respectivamente, 12,45% e 4,07%, e 11,86% e 3,89%. Esses resultados demonstram que, já aos 5 dias, os sistemas com calcário atingem praticamente a meta aceitável de conversão, de acidez e de umidade, enquanto a amostra branca ainda se encontra em evolução. As formulações com 3% e 5% de calcário apresentaram melhor desempenho global, com elevada conversão e maior estabilidade físico-química do produto. Dessa forma, os resultados indicam a possibilidade de redução do tempo de cura de nove para aproximadamente cinco dias, sem comprometimento da qualidade do fertilizante. Conclui-se que a adição controlada de calcário constitui uma estratégia tecnicamente viável, capaz de promover ganhos em eficiência química, redução de custos operacionais e aumento da produtividade, contribuindo para maior competitividade do processo industrial.

**Palavras-chave:** superfosfato simples; tempo de cura; acidulação; calcário; fósforo; eficiência industrial.

## ABSTRACT

*The production of single superphosphate (SSP) faces one of its main challenges in curing time, which directly affects operational efficiency, costs, and industrial productivity. In this context, this study proposes a technically simple approach: the controlled addition of limestone during the acidulation process, aiming to accelerate reaction kinetics and improve production performance. Bench-scale and batch experiments were conducted without limestone (blank sample) and with controlled additions of 3%, 5%, and 7% limestone, evaluating  $P_2O_5$  conversion (CNA/total  $P_2O_5$ ), residual acidity, and moisture throughout the curing period. Results showed significant performance gains with limestone addition. After 5 days of curing, formulations with 3% and 5% limestone already exhibited higher conversion compared to the blank, with values of 86.64% and 87.22%, respectively, while the blank reached 83.96%. On the 9th day, limestone formulations achieved conversions of 91.97% (3%) and 91.46% (5%), surpassing the blank (85.62%). Furthermore, reductions in residual acidity and moisture were observed in limestone formulations, indicating greater reaction progress and better system stabilization. At day 5, the blank sample showed higher acidity and moisture (19.29% and 4.66%), whereas formulations with 3% and 5% limestone presented 12.45% and 4.07%, and 11.86% and 3.89%, respectively. These findings demonstrate that by day 5, limestone systems nearly reach acceptable targets for conversion, acidity, and moisture, while the blank sample remains under development. Formulations with 3% and 5% limestone exhibited superior overall performance, with high conversion and greater physicochemical stability of the product. Thus, the results indicate the possibility of reducing curing time from nine to approximately five days without compromising fertilizer quality. It is concluded that controlled limestone addition is a technically viable strategy capable of promoting chemical efficiency gains, reducing operational costs, and increasing productivity, thereby enhancing industrial competitiveness.*

**Keywords:** *single superphosphate; curing time; acidulation; limestone; phosphorus; industrial efficiency.*

## LISTA DE FIGURA

FIGURA 1 - QUALIDADE DO SOLO BRASILEIRO.....	25
FIGURA 2 -“LEI DO MÍNIMO” DE LIEBIG .....	27
FIGURA 3 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	38
FIGURA 4 - MOINHO DE BOLAS .....	39
FIGURA 5 - CURVA DE REAÇÃO NA ACIDULAÇÃO .....	41
FIGURA 6 - REATOR PADDLE MIXER .....	45
FIGURA 7 - DEMISTER INDUSTRIAL .....	46
FIGURA 8 - GALPÃO DE CURA DO FOSFATO SUPER SIMPLES.....	52
FIGURA 9 - SISTEMA DE LAVADORES DE GASES TIPO SCRUBBERS .....	53
FIGURA 10 - KIT O PROCEDIMENTO DE ACIDULAÇÃO .....	58
FIGURA 11 - SUPER SIMPLES PÓS ACIDULAÇÃO .....	59
FIGURA 12 - SUPER SIMPLES PÓS ACIDULAÇÃO 01 DIA DE CURA.....	59
FIGURA 13 - ANÁLISE QUANTITATIVA QUÍMICA DA CURA .....	60
FIGURA 14 - PROCESSO DE CURA EM LABORATÓRIO.....	61
FIGURA 15 - SUPER SIMPLES APÓS OS 9 DIAS DE CURA.....	61
FIGURA 16 - ANÁLISE QUANTITATIVA QUÍMICA DA CURA .....	62

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ELEMENTOS ESSENCIAIS AS PLANTAS.....	29
TABELA 2 - FERTILIZANTES QUÍMICOS. ....	36
TABELA 3 - ADUBOS ORGÂNICOS COM BASE NA MATÉRIA SECA.....	37
TABELA 4 - ANÁLISE DAS AMOSTRAS, BRANCO, 3%, 5% E 7% DE CALCÁRIO. ...	62

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - EVOLUÇÃO DA UMIDADE DURANTE A CURA .....	65
GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DA ACIDEZ DURANTE A CURA.....	66
GRÁFICO 3 - EVOLUÇÃO CONVERSÃO P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> SCAN/TOTAL DURANTE A CURA. ....	67

## LISTA DE SIGLAS

CNA	Citrato Neutro de Amônio
SCAN	Solúvel em Citrato Neutro de Amônio
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fosforo, na forma agronômica
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
FBN	Fixação Biológica de Nitrogênio
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
PND	Plano Nacional de Desenvolvimento
RNA	Ácido Ribonucleico
TSP	Superfosfato Triplo
SSP	Superfosfato Simples
TT	Solúvel em solução ácida (Total)
AS	Solúvel em Água
RA	Razão de Acidulação
FOC	Fertilizantes Orgânico Composto
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
IFDC	International Fertilizer Development Center
ABISOLO	Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal

## SUMÁRIO

### Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
4.1	HISTÓRIA DOS FERTILIZANTES .....	21
4.2	O SOLO E AS PLANTAS COMO UM SISTEMA .....	23
<b>4.2.1</b>	<b>O Solo Brasileiro .....</b>	<b>23</b>
4.3	FATOR ECONÔMICO DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES .....	25
<b>4.3.1</b>	<b>Fosfatados, enxofre no mercado internacional .....</b>	<b>25</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Elementos Essenciais .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Aspectos Gerais dos Macronutrientes.....</b>	<b>30</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Aspectos Gerais dos Micronutrientes .....</b>	<b>31</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Elementos Úteis .....</b>	<b>31</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Elementos Tóxicos .....</b>	<b>32</b>
4.4	FERTILIZANTES .....	32
4.5	EVOLUÇÃO DOS FERTILIZANTES .....	32
<b>4.5.1</b>	<b>Classificação e Composição Química dos Fertilizantes: .....</b>	<b>34</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Expressão da Composição Química – Sistema NPK .....</b>	<b>34</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Conexão com a Hipótese do Presente Estudo: .....</b>	<b>35</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Adubos e Fertilizantes .....</b>	<b>35</b>
4.6	CLASSIFICAÇÃO DOS FERTILIZANTES .....	37
<b>4.6.1</b>	<b>Fertilizantes Simples .....</b>	<b>37</b>
4.7	PRODUÇÃO INDUSTRIAL DO SUPERFOSFATO SIMPLES (SSP) .....	37
<b>4.7.1</b>	<b>Visão Geral do Processo .....</b>	<b>37</b>
<b>4.7.2</b>	<b>Armazenamento e expedição .....</b>	<b>39</b>
<b>4.7.3</b>	<b>Rocha Fosfática: .....</b>	<b>39</b>
<b>4.7.4</b>	<b>Ácido Sulfúrico.....</b>	<b>40</b>

4.8	BALANÇO DE MASSA GLOBAL DO PROCESSO SSP .....	42
<b>4.8.1</b>	<b>Sem adição de calcário: .....</b>	<b>42</b>
<b>4.8.2</b>	<b>Com adição de calcário antes da acidulação: .....</b>	<b>42</b>
<b>4.8.3</b>	<b>Razão de Acidulação (RA) .....</b>	<b>43</b>
<b>4.8.4</b>	<b>Importância da RA no processo .....</b>	<b>44</b>
4.9	REAÇÃO NO MISTURADOR (PADDLE MIXER).....	44
<b>4.9.1</b>	<b>Funções do misturador: .....</b>	<b>45</b>
<b>4.9.2</b>	<b>Principais fenômenos nessa etapa: .....</b>	<b>45</b>
4.10	REAÇÃO E SOLIDIFICAÇÃO NA CORREIA DEN (DEMISTER).....	46
4.11	MODELAGEM CINÉTICA FORMAL .....	47
4.12	MODELO DO NÚCLEO NÃO REAGIDO (SHRINKING CORE MODEL) .....	47
4.13	REAÇÕES QUÍMICAS NA PRODUÇÃO DE SSP E TSP .....	48
4.14	DESINTEGRAÇÃO.....	50
4.15	CURA:.....	50
4.16	BENEFICIAMENTO .....	52
4.17	CONTROLE AMBIENTAL .....	53
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>54</b>
5.1	MATERIAIS .....	54
<b>5.1.1</b>	<b>Insumos .....</b>	<b>54</b>
5.2	METODO .....	55
<b>5.2.1</b>	<b>Procedimento experimental de acidulação em escala de bancada .....</b>	<b>55</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Fluxograma de acidulação em bancada: .....</b>	<b>55</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Delineamento experimental.....</b>	<b>57</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Condições de segurança e controle ambiental .....</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO. ....</b>	<b>57</b>
6.1	PROCEDIMENTO OPERACIONAL .....	57
<b>6.1.1</b>	<b>Etapa de reação .....</b>	<b>58</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Avaliação imediata.....</b>	<b>59</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Avaliação estrutural.....</b>	<b>59</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Análises químicas .....</b>	<b>60</b>
<b>6.1.5</b>	<b>Cura: .....</b>	<b>60</b>
<b>6.1.6</b>	<b>Tratamento dos dados .....</b>	<b>61</b>
6.2	EVOLUÇÃO DA UMIDADE DURANTE A CURA.....	64
6.3	COMPORTAMENTO DA ACIDEZ RESIDUAL.....	65

6.4	CONVERSÃO DE P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (CNA/TOTAL).....	66
6.5	EFEITO DO TEOR DE CALCÁRIO.....	67
6.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	68
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A baixa disponibilidade de fósforo nos solos tropicais altamente intemperizados constitui uma das principais limitações à produtividade agrícola no Brasil, em função da elevada acidez, da presença de óxidos de ferro e alumínio e da forte capacidade de adsorção desse nutriente. Nesse contexto, o uso de fertilizantes fosfatados é indispensável, destacando-se o superfosfato simples (SSP) como uma fonte relevante de fósforo, cálcio e enxofre (MALAVOLTA, 2006).

Do ponto de vista industrial, a produção de SSP baseia-se na reação entre rocha fosfática e ácido sulfúrico, seguida por uma etapa de cura, na qual ocorrem reações responsáveis pela estabilização química do produto e pela maximização da conversão do  $P_2O_5$  em formas assimiláveis. Apesar de essencial, essa etapa representa um dos principais gargalos do processo produtivo, uma vez que demanda tempos prolongados — tipicamente entre sete e nove dias — resultando em elevada ocupação de pátios, aumento de estoques intermediários e limitação da capacidade produtiva.

Sob a ótica cinética, a maior taxa de conversão ocorre nos primeiros dias após a acidulação, enquanto períodos subsequentes contribuem de forma marginal. Evidências experimentais indicam que, aos 5 dias de cura, sistemas convencionais atingem conversões em torno de 83–84%, enquanto formulações modificadas podem alcançar valores superiores a 86–87%, aproximando-se de sua estabilização, conforme Tabela 04, na página 63. Aos 9 dias, esses sistemas podem atingir conversões superiores a 91%, enquanto o sistema convencional permanece em níveis inferiores, evidenciando atraso na evolução reacional.

Nesse contexto, a modificação das condições químicas do sistema por meio da adição de insumos minerais surge como alternativa promissora. O calcário apresenta potencial para atuar como modulador da acidez e da cinética de reação, influenciando diretamente a formação de fases fosfatadas e a estabilidade do produto.

Diante disso, este trabalho avalia, em condições experimentais de bancada e em batelada, a influência da adição controlada de calcário (0%, 3%, 5% e 7%) na produção de SSP, com ênfase na evolução da conversão de  $P_2O_5$  (CNA/ $P_2O_5$  total), acidez residual e umidade ao longo do período de cura. Os resultados do estudo de caso indicam que, já aos 5 dias, formulações com 3% e 5% de calcário atingem conversões de aproximadamente 86,6% e

87,2%, respectivamente, superiores ao sistema convencional (83,9%), além de apresentarem menores teores de acidez e umidade. Aos 9 dias, essas formulações alcançam valores próximos a 92%, confirmando a antecipação da estabilização do sistema.

Como hipótese central, foi avaliada a adição controlada de calcário, a qual permitiu a redução do tempo de cura de nove para aproximadamente cinco dias, sem prejuízo da qualidade do fertilizante. Essa estratégia representa uma alternativa tecnicamente viável para aumento da eficiência do processo, com impacto direto na redução de custos operacionais e no aumento da produtividade industrial.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o processo de acidulação da rocha fosfática com ácido sulfúrico, com a adição controlada de calcário como agente inerte, com foco na redução do tempo de cura do Superfosfato Simples (SSP).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Avaliar o efeito da adição de calcário sobre o processo de acidulação e a etapa de cura do superfosfato simples.
- ✓ Comparar a conversão de  $P_2O_5$  total em formas solúveis (CNA + água), verificando ganhos de disponibilidade agronômica.
- ✓ Analisar a evolução da acidez residual e da umidade durante o período de cura.
- ✓ Verificar melhorias nas propriedades físicas do fertilizante, como porosidade, granulação e estabilidade mecânica.
- ✓ Estudar o potencial de redução do tempo de cura, relacionando-o à eficiência produtiva e ao desempenho industrial.

### 3 JUSTIFICATIVA

A agricultura brasileira está estabelecida predominantemente sobre solos tropicais altamente intemperizados, caracterizados por elevada acidez, baixa fertilidade natural e alta capacidade de fixação de fósforo. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Latossolos e Argissolos ocupam grande parte do território nacional, sendo solos profundos, porém quimicamente empobrecidos em função da intensa lixiviação de bases (SANTOS et al., 2018). Nesses ambientes, o fósforo destaca-se como o nutriente mais limitante à produção agrícola, não apenas pelos baixos teores naturais, mas principalmente pela forte adsorção aos óxidos de ferro e alumínio (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Nesse contexto, os fertilizantes fosfatados assumem papel estratégico para a sustentabilidade da produção agrícola nacional. Entre eles, o superfosfato simples (SSP) destaca-se como uma das fontes mais tradicionais e amplamente utilizadas no Brasil, especialmente em sistemas que demandam fornecimento conjunto de fósforo, cálcio e enxofre. Sua relevância agrônômica está associada à sua solubilidade, disponibilidade imediata de fósforo e contribuição para a correção química do solo, impactando diretamente o estabelecimento inicial das culturas, o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, os níveis de produtividade.

Apesar de sua importância, o processo produtivo do SSP apresenta limitações relevantes, particularmente na etapa de cura. Essa fase é determinante para a conversão do  $P_2O_5$  em formas assimiláveis e para a estabilização química do produto, porém, exige tempos prolongados, geralmente entre sete e nove dias. Tal condição implica aumento de custos operacionais, elevada ocupação de pátios industriais e limitação da capacidade produtiva, tornando-se um dos principais gargalos do processo.

Sob a perspectiva econômica, a produção de fertilizantes fosfatados no Brasil está fortemente condicionada à disponibilidade e ao custo de insumos importados, especialmente o enxofre, utilizado na produção de ácido sulfúrico. A elevação recente dos preços internacionais desse insumo intensifica a pressão sobre os custos industriais, reduzindo a competitividade do setor. Considerando a elevada dependência externa do país em relação a fertilizantes (ANDA, 2023), torna-se estratégico desenvolver soluções que aumentem a eficiência do processo produtivo e reduzam custos associados à acidulação e ao tempo de estocagem.

Nesse cenário, a adição controlada de calcário ao processo de produção de SSP surge como uma alternativa tecnicamente promissora. Sua incorporação pode atuar na modulação do sistema reacional, promovendo ajuste do balanço ácido-base, redução da acidez residual e melhoria das propriedades físicas do produto, como estabilidade e manuseio. Do ponto de vista agronômico, a presença de cálcio pode ainda influenciar o microambiente químico no solo, reduzindo a fixação inicial de fósforo e favorecendo sua disponibilidade para as plantas.

Adicionalmente, a redução do tempo de cura representa um avanço significativo sob o ponto de vista tecnológico e industrial, uma vez que está diretamente associada ao aumento da eficiência da conversão química nas etapas iniciais da reação. A otimização de parâmetros como relação ácido/rocha, granulometria e umidade, associada à adição de calcário, pode viabilizar a obtenção de um produto com qualidade equivalente em menor tempo, promovendo ganhos em produtividade e redução de custos operacionais.

Dessa forma, esta pesquisa justifica-se pela relevância agronômica do superfosfato simples na agricultura brasileira, pela necessidade de aumento da eficiência no uso de fertilizantes fosfatados em solos tropicais e pela demanda por soluções tecnológicas que reduzam custos e ampliem a competitividade industrial. Ao investigar a redução do tempo de cura associada à adição de calcário, este trabalho busca contribuir simultaneamente para o avanço do conhecimento científico, a otimização de processos industriais e a melhoria da eficiência do uso do fósforo na agricultura.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 HISTÓRIA DOS FERTILIZANTES

Não se sabe ao certo quando surgiu a agricultura em função de ter surgido antes da escrita(Zanenco 2016). Sabe-se que por volta de 12.000 anos a.C. as atividades agrícolas surgiram de forma independente em várias áreas de várzeas e vales a exemplo do Rio Nilo no Egito, Egito, Mesopotâmia e outras civilizações antigas,( ALVES, José, 2018)

O cultivo normalmente era feito após o recuo das águas dos rios que eram transbordadas pelas chuvas e enriqueciam o solo pela sedimentação, tornando os leitos dos rios mais úmidos e férteis, propício para o plantio.

Com o tempo, houve a necessidade de introduzir substâncias químicas no processo agrícola. Em meados do século XIX foram lançadas várias bases de nutrição mineral a exemplo do osso moído que foi comercializado, do guano que foi explorado o salitre também exportado.

A partir dos estudos realizados por Liebig derrubou a teoria do húmus, segundo a qual as plantas obtinham seu carbono a partir da matéria-orgânica do solo. Na época em 1840, Liebig difundiu a ideia de que o aumento da produção agrícola era proporcional à quantidade de substâncias químicas acionadas ao solo. Assim, a credibilidade conferida às descobertas de Liebig deu-se em função de estarem comprovadas cientificamente. Liebig é considerado o maior precursor da “agroquímica” consideração em função de que concluiu que as plantas se alimentavam de nutrientes, resultado que abriu caminho para os adubos minerais e orgânicos, com isso, os setores produtivo, industrial e agrícola, abriram um amplo e promissor mercado: o de fertilizantes artificiais (PLANETA ORGÂNICO, 2002).

Em 1843, na Inglaterra houve a estação experimentais onde várias pesquisas foram conduzidas. (Damiani, 1997) Na ocasião foi estudada a química da nutrição de plantas, o superfosfato foi inventado e novos fertilizantes foram experimentados. Outro estudo a favor dos fertilizantes que contribuiu com o crescimento das plantas em solução aquosa contendo várias substâncias, denominada soluções nutritivas foi em 1860 realizado por Knop, a técnica desenvolvida foi bastante aprimorada. Com o passar dos tempos, a química sofreu avanços expressivos e tornou possível a produção de novos fertilizantes (Folares).

Até o princípio do século XX houve vários estudos relacionados ao desenvolvimento dos adubos, entre eles o da mineração dos fosfatos naturais nos EUA e Norte da África. A produção do Superfosfato e a demonstração do valor dos ossos como adubos que podia ser aumentada tratando-se com ácido clorídrico ou sulfúrico. Os norte-americanos foram os pioneiros no preparo, utilização e mistura de adubos, o que só aconteceu na Europa no começo do século XX, na Inglaterra (BARRETO, SILVA E SOUSA JÚNIOR, 2002).

Assim, o século XX presenciou os maiores avanços no consumo de adubos e na sua tecnologia. Em 1903 foi iniciada a fabricação do nitrato de cálcio. Em 1904 foi desenvolvido um método viável para a síntese direta da amônia usando nitrogênio do ar e hidrogênio da água. Em 1918 começa a produção de salitre sintético. Já em 1920, a produção de fosfatos de amônia nos EUA e na Europa, começou a ser desenvolvido o fosfato diamônico e o fosfato monoamônico (BARRETO, SILVA E SOUSA JÚNIOR, 2002).

No Brasil, a introdução de adubos químicos ocorreu por volta de 1918, por meio de importações do salitre do Chile e de empresas alemãs que começaram a comercializar nitrogênio, potássio e superfosfato. Até então era muito usado o esterco e a farinha de ossos provenientes das indústrias de cola. Em termos de implantação de indústrias de fertilizantes, o Brasil nada se fez no período de 1930 a 1960. Somente a partir de 1960, em função das diretrizes voltadas para o desenvolvimento agrícola é que o Brasil buscou por maior produtividade, em consequência houve expansão da indústria de fertilizantes (BARRETO, SILVA E SOUSA JÚNIOR, 2002).

O resultado foi a criação dos Selos Verdes, uma certificação que fundamenta a produção com técnicas e processos que não comprometem o meio ambiente.

Na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (ECO) em 1992, realizada no Rio de Janeiro, surge o conceito de sustentabilidade como uma nova ordem que integra o problema ambiental ao campo da economia.

A agricultura é uma atividade que mais transforma o meio ambiente. O uso de substâncias químicas nas lavouras faz com que a produtividade se eleva de forma que não haja necessidade de abrir novas fronteiras agrícolas (ANDA, 2023).

Na prática, os avanços da agricultura continuaram principalmente nos países em desenvolvimento.

## 4.2 O SOLO E AS PLANTAS COMO UM SISTEMA

### 4.2.1 O Solo Brasileiro

A agricultura brasileira desenvolve-se majoritariamente sobre solos tropicais altamente intemperizados, cuja gênese está associada a longos períodos de estabilidade geomorfológica sob clima quente e úmido. Esses solos apresentam avançado grau de evolução pedogenética, intensa lixiviação de bases e predomínio de minerais de baixa atividade na fração argila. Os solos predominantes no Brasil, especialmente Latossolos e Argissolos, caracterizam-se por elevado grau de intemperismo, baixa fertilidade natural e forte acidez. Essa condição decorre da remoção progressiva de cátions básicos ao longo do tempo geológico, resultando em perfis profundos, bem drenados, porém quimicamente empobrecidos, (Santos et al., 2018), como ilustrado na Figura 1.

A acidez constitui um dos principais fatores limitantes desses solos. Em grande parte das áreas agrícolas brasileiras, o pH encontra-se abaixo de 5,5, com presença significativa de alumínio trocável, o que pode provocar toxidez às plantas e restringir o desenvolvimento radicular. Segundo Novais et al. (2007), em solos tropicais altamente intemperizados, a baixa saturação por bases e a elevada atividade de  $Al^{3+}$  são características estruturais do sistema químico do solo, exigindo práticas corretivas como a calagem para viabilizar a produção agrícola em níveis competitivos, com baixo CTC Capacidade de troca Catiônica).

Entretanto, entre os nutrientes essenciais, o fósforo (P) é amplamente reconhecido como o elemento mais limitante nos solos tropicais brasileiros (Raij 2011), afirma que a deficiência de fósforo é generalizada em solos altamente intemperizados, em virtude tanto dos baixos teores naturais quanto da elevada capacidade de retenção do nutriente. Essa retenção está associada à presença predominante de óxidos de ferro e alumínio e à caulinita na fração argila, que promovem forte adsorção específica de fosfatos, reduzindo sua disponibilidade às plantas.

Destacam que, em solos tropicais, a eficiência do fósforo aplicado é frequentemente limitada pela rápida transformação do P solúvel em formas menos disponíveis, fenômeno conhecido como fixação de fósforo, (Novais e Smyth, 1999). Esse processo é intensificado em ambientes ácidos, nos quais há maior reatividade dos óxidos de  $Fe^{3+}$  e  $Al^{3+}$ . Dessa forma, mesmo

após a aplicação de fertilizantes fosfatados, grande parte do nutriente pode tornar-se temporariamente indisponível, reduzindo a eficiência agronômica das fontes utilizadas.

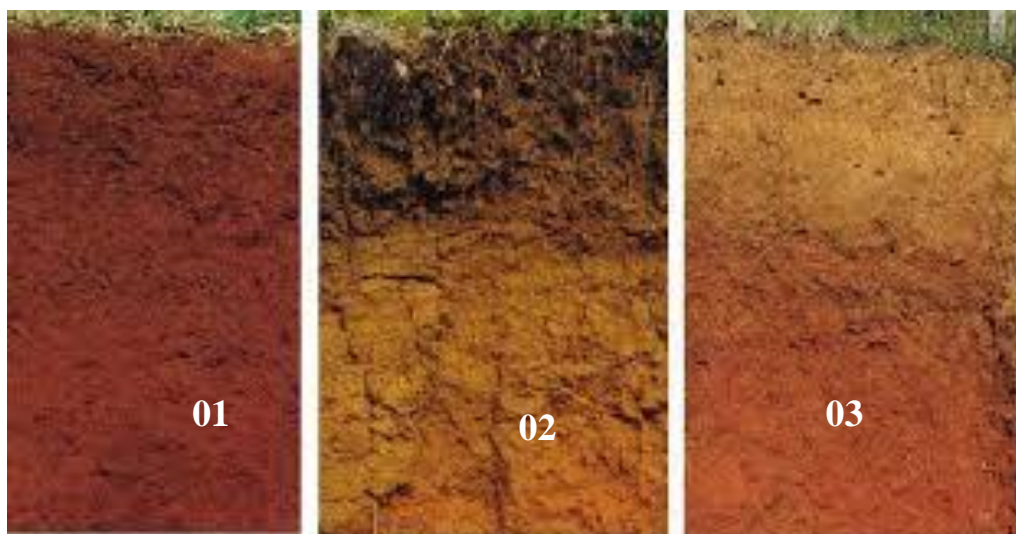
A expansão agrícola do Cerrado brasileiro constitui um exemplo emblemático da superação dessas limitações químicas. (Lopes e Guilherme, 2016), o desenvolvimento produtivo dessa região somente foi possível mediante a correção sistemática da acidez e a aplicação intensiva de fertilizantes fosfatados, evidenciando que a produtividade agrícola brasileira está intrinsecamente vinculada ao manejo químico dos solos.

Nesse contexto, a qualidade e a eficiência das fontes fosfatadas tornam-se estratégicas. A solubilidade do fósforo em água e em citrato neutro de amônio, parâmetros tradicionalmente utilizados para avaliar fertilizantes fosfatados acidulados, dependem diretamente do grau de reação química durante o processo de acidulação e das transformações ocorridas durante o período de cura. Assim, o aprimoramento tecnológico do processo industrial — incluindo o controle da relação ácido/rocha (RA), da umidade, diâmetro da partícula, acidez e do tempo de cura, pode influenciar significativamente a disponibilidade inicial de fósforo no solo, com reflexos diretos na eficiência agronômica.

Considerando que os solos brasileiros são predominantemente ácidos, de baixa fertilidade natural e com elevada capacidade de fixação de fósforo, pesquisas voltadas ao melhoramento do processo de acidulação e à redução do tempo de cura do superfosfato simples apresentam relevância científica e tecnológica. Tais estudos contribuem não apenas para ganhos industriais e logísticos, mas também para o aumento da eficiência de uso do fósforo em sistemas agrícolas tropicais, promovendo maior sustentabilidade na produção de alimentos.

Os três perfis de solo apresentados na Figura 1, exemplificam diferentes condições químicas e físicas encontradas em ambientes agrícolas brasileiros. O perfil 01 representa um solo altamente intemperizado, com acidez elevada e baixa saturação por bases, típico de áreas não corrigidas, onde há limitação ao desenvolvimento radicular. O perfil 02 mostra um solo submetido à calagem, com redução da acidez e maior disponibilidade de nutrientes, favorecendo o crescimento das plantas. Já o perfil 03 retrata um solo manejado de forma adequada, com correção química e aplicação de fertilizantes fosfatados, resultando em maior eficiência agronômica e sustentabilidade produtiva. Esses perfis evidenciam a importância do manejo químico para superar as limitações naturais dos solos tropicais brasileiros e garantir a viabilidade da agricultura em larga escala.

Figura 1-Qualidade do solo brasileiro



Fonte: Embrapa, – Soils in Brazil (2026)

### 4.3 FATOR ECONÔMICO DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES

#### 4.3.1 Fosfatados, enxofre no mercado internacional

Além das limitações químicas intrínsecas aos solos tropicais brasileiros, a sustentabilidade da produção agrícola nacional está fortemente condicionada à dinâmica do mercado internacional de insumos, especialmente fertilizantes e matérias-primas estratégicas.

O Brasil é um dos maiores consumidores globais de fertilizantes, porém mantém elevada dependência externa tanto de fontes potássicas quanto de matérias-primas para produção de fertilizantes fosfatados e nitrogenados (ANDA, 2023).

No caso específico dos fertilizantes fosfatados acidulados, como o superfosfato simples (SSP), o superfosfato triplo (TSP), o monoamônio fosfato (MAP) e o ácido fosfórico, o enxofre desempenha papel central na cadeia produtiva. A produção de SSP e TSP depende diretamente do ácido sulfúrico, cuja síntese industrial utiliza enxofre elementar como principal matéria-prima. Assim, oscilações no preço internacional do enxofre impactam diretamente o custo final desses fertilizantes.

De acordo com relatórios internacionais de mercado de fertilizantes (CRU Group, 2025; World Bank, 2025), os anos de 2025 e 2026 foram marcados por elevação significativa

nas cotações do enxofre no mercado internacional, impulsionadas por restrições logísticas globais, aumento da demanda asiática por ácido sulfúrico e ajustes na oferta oriunda do setor de refino de petróleo e gás. Como o enxofre comercializado globalmente é majoritariamente subproduto do refino de combustíveis fósseis, sua disponibilidade está diretamente associada à dinâmica energética mundial.

O aumento do custo do enxofre reflete-se em toda a cadeia fosfatada. O ácido fosfórico, base para produção de TSP e MAP, também depende do ácido sulfúrico em sua rota úmida de fabricação. Dessa forma, a elevação no preço do enxofre provoca aumento do custo de produção do ácido sulfúrico, que por sua vez encarece o ácido fosfórico e os fertilizantes fosfatados dele derivados. Essa interdependência estrutural demonstra que a eficiência industrial no processo de acidulação, incluindo otimização da relação ácido/rocha e redução do tempo de cura, assume não apenas relevância técnica, mas também econômica.

No cenário brasileiro, a dependência de importações amplia a vulnerabilidade às flutuações internacionais. Segundo dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2023), mais de 80% dos fertilizantes consumidos no país dependem, direta ou indiretamente, de matérias-primas importadas. Essa condição torna o custo agrícola nacional sensível a variações cambiais, fretes internacionais e políticas comerciais externas.

Adicionalmente, as políticas tarifárias internacionais podem influenciar a competitividade dos fertilizantes brasileiros no mercado externo. No caso de exportações para os Estados Unidos, eventuais ajustes em tarifas de importação ou medidas protecionistas podem afetar a entrada de produtos brasileiros, alterando margens comerciais e competitividade. (Krugman e Obstfeld 2018), tarifas de importação atuam como instrumento de política comercial capaz de elevar o preço doméstico do produto importado no país de destino, reduzindo competitividade e alterando fluxos de comércio internacional.

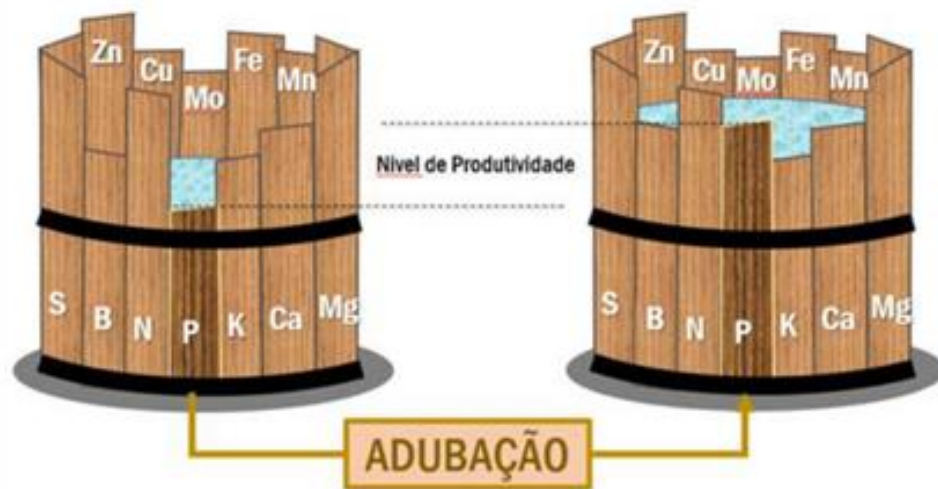
Portanto, a elevação do preço internacional do enxofre em 2025 a 2026, associada à dependência brasileira de insumos externos e à sensibilidade às políticas tarifárias internacionais, reforça a importância de estratégias tecnológicas que aumentem a eficiência do uso de ácido sulfúrico na produção de fertilizantes fosfatados. A redução do tempo de cura do superfosfato simples, aliada à maximização da conversão química durante a acidulação, pode representar não apenas um avanço técnico, mas uma resposta estratégica às pressões econômicas globais, contribuindo para redução de custos industriais, maior competitividade e sustentabilidade do setor.

### 4.3.2 Elementos Essenciais

Os elementos essenciais são os nutrientes minerais, sem os quais as plantas não vivem, ou seja, quando a planta não vive sem um determinado elemento, este é considerado essencial (UNIFERTIL, 2012).

Tanto o crescimento como o desenvolvimento das plantas dependem de um fluxo contínuo de sais minerais, além de outros fatores como a água, a luz e o gás carbônico que são essenciais para o desempenho das funções metabólicas das células. Os nutrientes são adquiridos na forma de íons inorgânicos e entra na biosfera por meio do sistema radicular da planta. Este fenômeno ficou conhecido como “Lei dos Mínimos” (Figura 2), sendo o alemão (Liebig) o primeiro a identificar a base da nutrição mineral (NUNES, 2013).

Figura 2-“Lei do mínimo” de Liebig



Fonte: Revista Cultivar, Flávio Bonini (2025)

Entre os estudos de Liebig, descobriu que o desenvolvimento e a produtividade da planta são limitados em função do nutriente, e para que ocorra maior desempenho das plantas, observou que os elementos químicos tais como o nitrogênio, cálcio, potássio, enxofre entre

outros como o sódio e o ferro eram essenciais para o desenvolvimento e produtividade das plantas (NUNES, 2013).

Assim, é de suma importância que as plantas cresçam e se desenvolvam quando absorvem água e elementos minerais, uma vez que eles são necessários à medida que seu desenvolvimento acontece, e para que isso ocorra, é necessário que todos estejam disponíveis, e poderão ser modificados se alguns deles não tiverem adequadamente.

Diante deste cenário, de alerta para a disponibilidade de nutrientes nas plantas, e afirma que são vários os fatores de influência, entre os principais estão, (Unifertil,2012):

- a) Material de origem do solo e estágio de intemperismo;
- b) Teores de argila e matéria orgânica;
- c) Interações positivas (sinergismo) e negativas (antagonismo) com outros nutrientes;
- d) Reações de oxirredução;
- e) Espécie cultivada;
- f) Intensidade do uso do solo;
- g) Exsudatos orgânicos de raízes e os subprodutos de microrganismos;
- h) pH do solo.

Dois critérios são essenciais para o progresso da química no desenvolvimento de purificação de sais e determinação de elementos minerais que são associados ao desenvolvimento do cultivo, são eles: o direto e o indireto. O critério direto atribui ao elemento de algum composto ou reação sem a qual a planta não vive. No critério indireto, sua deficiência torna impossível para as plantas completarem o ciclo vegetativo ou reprodutivo, as plantas somente podem ser corrigidas com a aplicação do referido elemento e o elemento deve estar envolvido na nutrição da planta (NUNES, 2013).

Num contexto geral, a literatura considera elementos essenciais e suas divisões os de acordo com os apresentados na Tabela 1, assim visualizada:

Tabela 1-Elementos essenciais as plantas

Nutriente	Símbolo	Classificação
Carbono	C	Macronutrientes
Hidrogênio	H	Macronutrientes
Oxigênio	O <sub>2</sub>	Macronutrientes
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	Macronutrientes
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Macronutrientes
Potássio	K <sub>2</sub> O	Macronutrientes
Cálcio	CaO ou Ca	Macronutrientes
Magnésio	MgO	Macronutrientes
Enxofre	SO <sub>4</sub> ou S	Macronutrientes
Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ou Fe	Micronutrientes
Manganês	Mn	Micronutrientes
Zinco	Zn	Micronutrientes
Cobre	Cu	Micronutrientes
Boro	B	Micronutrientes
Molibdênio	Mo	Micronutrientes
Cobalto	Co	Micronutrientes
Níquel	Ni	Micronutrientes

Fonte : Adaptado de Nunes (2013)

A divisão em macro e micronutrientes está relacionada a quantidade de cada nutriente utilizado pelas plantas. Os macronutrientes são necessárias as plantas de acordo com a ordem de gramas por quilograma (g/kg) de matéria seca de cada planta. Enquanto os micronutrientes são necessários na ordem de miligramas por quilograma (mg/kg) de matéria seca de cada planta. Os autores enfatizam ainda que apenas o carbono, o hidrogênio e o oxigênio não são minerais, os demais nutrientes são de natureza mineral. O carbono é obtido a partir do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o hidrogênio a partir da água (H<sub>2</sub>O) e o oxigênio a partir do CO<sub>2</sub> e da H<sub>2</sub>O, (Pes e Arenhardt, 2015).

Nesse prisma, salientam que a única distinção da classificação entre macro e micronutrientes é quantitativa, não significando diferentes níveis de importância para a nutrição das plantas. Isto porque, os macronutrientes ocorrem nas plantas em concentração de 10 a 5.000 vezes superior à dos micronutrientes, dependendo da planta e do órgão analisado, (Barreto, Silva e Sousa Júnior, 2002).

De acordo com Barreto, Silva e Sousa Júnior (2002), os nutrientes são expressos em porcentagens da seguinte maneira

- a) Nitrogênio: Sob a forma elementar, isto é, porcentagem de N;
- b) Fósforo: Porcentagem de  $P_2O_5$ ;
- c) Potássio: Porcentagem de  $K_2O$ ;
- d) Cálcio: Porcentagem de  $CaO$ ;
- e) Magnésio: Porcentagem de  $MgO$ ;

Os demais nutrientes são representados sob as formas elementares, assim representadas, Exemplo:

Nitrato de Sódio ( $NaNO_3$ ) - 16,5 % de N.

Nitrato de Potássio ( $KNO_3$ ) - 13,9% de N e 46,6% de  $K_2O$ .

#### **4.3.3 Aspectos Gerais dos Macronutrientes**

Os macronutrientes são exigidos em maiores quantidades pelas plantas e desempenham funções vitais no metabolismo vegetal. Com base em Pes e Arenhardt (2015), seguem suas principais características:

**Carbono (C):** Absorvido via dióxido de carbono ( $CO_2$ ) pelos estômatos. Representa de 40 a 45% da matéria seca vegetal.

**Hidrogênio (H):** Proveniente da água ( $H_2O$ ), participa da fotossíntese. Corresponde a cerca de 5% da matéria seca.

**Oxigênio (O):** Absorvido do ar e da água. Compõe aproximadamente 45% da matéria seca.

**Nitrogênio (N):** Essencial para proteínas, ácidos nucleicos e vitaminas. Representa de 2 a 4% da matéria seca. Exige manejo cuidadoso devido às perdas por erosão, lixiviação e volatilização.

**Fósforo ( $P_2O_5$ ):** Participa da transferência de energia (ATP), divisão celular e estrutura vegetal. Solos brasileiros geralmente apresentam deficiência desse nutriente.

Potássio ( $K_2O$ ): Atua como ativador enzimático e regula a turgidez celular. Contribui para resistência a estresses ambientais.

Cálcio ( $CaO$ ): Componente estrutural da parede celular. Atua na fotossíntese e no desenvolvimento radicular.

Magnésio ( $MgO$ ): Parte central da molécula de clorofila. Ativa enzimas em processos fisiológicos.

Enxofre ( $SO_4$ ): Participa da síntese de aminoácidos e vitaminas. Influencia o aroma de hortaliças como alho e cebola.

#### **4.3.4 Aspectos Gerais dos Micronutrientes**

Micronutrientes são requeridos em menores quantidades, mas são igualmente essenciais:

Ferro (Fe): Participa da fotossíntese e da respiração celular. Sua disponibilidade depende do pH do solo.

Manganês (Mn): Ativa enzimas e contribui para a fotossíntese e FBN em leguminosas.

Boro (B): Essencial para o crescimento radicular e reprodutivo. Influenciado pelo pH e matéria orgânica.

Zinco (Zn): Ativa enzimas envolvidas na fotossíntese e produção de hormônios.

Cobre (Cu): Atua na fotossíntese, respiração e metabolismo de proteínas.

Molibdênio (Mo): Participa do metabolismo do nitrogênio, especialmente em leguminosas.

Cloro (Cl): Atua na fotossíntese e na abertura dos estômatos.

Níquel (Ni): Ativa enzimas essenciais. Pode causar toxidez em solos brasileiros.

#### **4.3.5 Elementos Úteis**

São elementos que, embora não essenciais, podem beneficiar o crescimento e resistência das plantas:

Cobalto (Co): Importante para a Fixação Biológica de Nitrogênio.

Silício (Si): Reduz a incidência de pragas e doenças, melhora a estrutura foliar.

Sódio (Na): Pode substituir o potássio em algumas espécies, auxiliando na fotossíntese.

#### 4.3.6 Elementos Tóxicos

Elementos como o alumínio ( $Al^{3+}$ ) e Ferro ( $Fe^{3+}$ ) são tóxicos às plantas, especialmente em solos ácidos ( $pH < 5,5$ ), baixo CTC. Seus efeitos incluem:

Engrossamento e redução do crescimento radicular.

Prejuízo na absorção de água e nutrientes.

Interferência no metabolismo celular.

#### 4.4 FERTILIZANTES

Entende-se por fertilizantes todo material que contenha pelo menos um macronutriente primário, em quantidade conhecida e em uma forma assimilável pela planta (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

De acordo com Barreto, Silva, Sousa Júnior, (2002) fertilizante é toda substância mineral ou orgânica natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes das plantas.

Os autores afirmam que sem o fertilizante mineral, a agricultura jamais teria conseguido quadruplicar seus rendimentos em 50 anos, tornando-se assim um dos principais fatores do padrão de vida no mundo atual.

#### 4.5 EVOLUÇÃO DOS FERTILIZANTES

A evolução dos fertilizantes está intrinsecamente associada à intensificação agrícola e ao crescimento populacional global, sobretudo a partir do século XX, quando a demanda por alimentos exigiu aumento expressivo da produtividade por unidade de área. A consolidação da indústria de fertilizantes minerais, impulsionada pelos avanços da química industrial e pela expansão do uso de ácidos minerais em processos de acidulação, permitiu a produção em larga escala de insumos com elevada concentração e previsibilidade nutricional (MALAVOLTA, 2006).

No caso específico dos fertilizantes fosfatados, o desenvolvimento tecnológico esteve fortemente vinculado ao domínio dos processos de acidulação da rocha fosfática com ácido sulfúrico ou ácido fosfórico, resultando na produção de superfosfato simples (SSP) e superfosfato triplo (TSP). Esses processos envolvem reações heterogêneas complexas, nas quais fatores como granulometria, relação ácido/rocha (R.A.), temperatura e difusão iônica influenciam diretamente a cinética de formação do fosfato monocálcico e, conseqüentemente, a fração de fósforo solúvel em citrato neutro de amônio ( $P_2O_5$  CNA) (RAIJ, 2011).

Ao longo da evolução industrial, buscou-se não apenas aumentar a concentração de nutrientes, mas também otimizar a eficiência do processo produtivo, reduzir tempo de cura e controlar o teor de ácido livre. Nesse contexto, modificações na composição do meio reacional passaram a ser investigadas. Já na década de 1950, tecnologias industriais norte-americanas incorporavam o uso de carbonatos, como calcário (*limestone*), na produção de fertilizantes fosfatados. A patente **US 3006754A**, depositada por Sullivan (1959) e concedida em 1961 à *The Anaconda Company*, descreve um processo de fabricação de *treble superphosphate* no qual o calcário reage com ácido fosfórico, contribuindo para o aumento do teor de fósforo disponível e para a redução de limitações operacionais durante a acidulação, especialmente no que se refere ao controle do ácido livre e à melhoria das propriedades físicas do produto (SULLIVAN, 1959).

Essa referência histórica demonstra que a manipulação controlada do equilíbrio ácido-base e da composição química do sistema reacional constitui estratégia tecnológica consolidada há mais de meio século, reforçando a relevância científica de investigações contemporâneas voltadas à modulação cinética do processo de cura do superfosfato simples por meio da adição de carbonatos.

Paralelamente, a evolução dos fertilizantes também contemplou o aumento da eficiência agrônômica por meio da formulação de produtos adaptados às exigências edafoclimáticas e às demandas nutricionais específicas das culturas. Atualmente, os fertilizantes são desenvolvidos considerando interações solo-planta, dinâmica dos nutrientes, estágios fenológicos e princípios de manejo sustentável (EMBRAPA, 2018).

#### 4.5.1 Classificação e Composição Química dos Fertilizantes:

Conforme Dias e Fernandes (2006), os fertilizantes podem ser classificados em três grandes grupos: minerais, orgânicos e organominerais, distinção que reflete tanto a natureza das matérias-primas quanto os mecanismos de disponibilização de nutrientes.

Os **fertilizantes minerais** são produtos de natureza predominantemente mineral, naturais ou sintéticos, obtidos por processos físicos, químicos ou físico-químicos, destinados ao fornecimento direto de nutrientes essenciais às plantas. Caracterizam-se por elevada concentração e disponibilidade imediata, com composição definida e padronizada industrialmente.

Os **fertilizantes orgânicos**, por sua vez, são obtidos a partir de matérias-primas de origem vegetal, animal, urbana ou industrial, mediante processos físicos, químicos ou bioquímicos. Apresentam liberação gradual de nutrientes, dependente da mineralização microbiana, e maior variabilidade composicional.

Os **fertilizantes organominerais** resultam da combinação tecnológica entre fontes minerais e orgânicas, buscando associar disponibilidade imediata e melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Do ponto de vista químico, a qualidade dos fertilizantes minerais está associada à garantia analítica dos nutrientes declarados, fator determinante para previsibilidade agrônômica (SILVA; LOPES, 2011).

#### 4.5.2 Expressão da Composição Química – Sistema NPK

A composição dos fertilizantes é tradicionalmente expressa pelo sistema NPK, no qual os teores percentuais de Nitrogênio (N), Fósforo (expresso como  $P_2O_5$ ) e Potássio (expresso como  $K_2O$ ) são indicados em sequência numérica, separados por hífen (por exemplo, 18-46-0). Cada valor representa a quantidade percentual do nutriente presente em 100 kg do produto comercial (SILVA; LOPES, 2011).

Assim, um fertilizante 18-46-0 contém:

- 18% de N;
- 46% de  $P_2O_5$ ;

- 0% de  $K_2O$ .

Da mesma forma, um fertilizante 12-6-22 + 2%  $MgO$  contém:

- 12% de N;
- 6% de  $P_2O_5$ ;
- 22% de  $K_2O$ ;
- 2% de  $MgO$ .

A padronização dessas formulações permite comparabilidade técnica entre produtos e fundamenta recomendações agronômicas baseadas em balanço nutricional e eficiência de absorção.

#### **4.5.3 Conexão com a Hipótese do Presente Estudo:**

Considerando que a eficiência agronômica dos fertilizantes fosfatados está diretamente relacionada à fração de fósforo solúvel (especialmente  $P_2O_5$  CNA), torna-se evidente que intervenções no processo industrial capazes de alterar a cinética de reação e a estabilização do fosfato monocálcico possuem relevância estratégica. A adição controlada de calcário durante a acidulação do SSP, ao modificar o equilíbrio ácido-base e potencialmente elevar a temperatura reacional por reação exotérmica secundária, pode influenciar a taxa de conversão e o tempo de cura, inserindo-se na tradição histórica de ajustes tecnológicos já explorados industrialmente.

Dessa forma, a investigação proposta nesta dissertação não representa ruptura conceitual, mas sim aprofundamento científico de uma estratégia tecnológica previamente reconhecida, agora analisada sob perspectiva cinética e de eficiência de conversão do  $P_2O_5$ .

#### **4.5.4 Adubos e Fertilizantes**

Tanto os adubos como os fertilizantes têm como objetivo suprir as deficiências em substâncias vitais dos vegetais, procedimento realizado na agricultura no intuito de aumentar a produção, uma vez que o adubo corrige a deficiência do solo, enquanto o fertilizante é toda substância mineral ou orgânica natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes de plantas (BARRETO, SILVA, SOUSA JÚNIOR, 2002). Os autores afirmam que sem o

fertilizante mineral a agricultura jamais teria conseguido quadruplicar seus rendimentos em 50 anos, tornando-se assim um dos principais fatores do padrão de vida no mundo atual.

Segundo Amaro (2011), o adubo mineral NPK 4-14-8, fornece 4% de nitrogênio, 14% de fósforo e 8% de potássio, portanto a formulação 4-30-16 possui 4% de nitrogênio, 30% de fósforo e 16% de potássio. Diante desta porcentagem, onde se recomenda 200 g. de formulação NPK 4-14-8, recomenda-se da formulação 4-30-16 e na sequência complementa-se com N. Assim, observa-se que a adubação de plantio é desprovida em fósforo. No caso do enxofre, pode estar presente na atmosfera e ser incorporado no solo por meio das chuvas. No mercado atual é comum encontrar os micronutrientes cobre ou zinco, já preparados nas formulações NPK (AMARO, 2011).

A porcentagem média do fósforo, nitrogênio e potássio é apresentada na Tabela 2, em uma produção de pimenta na composição dos principais fertilizantes químicos.

Tabela 2- Fertilizantes químicos.

FERTILIZANTES QUÍMICOS	N (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)
Ureia	44	-	-
Sulfato de amônio	20	-	-
Superfosfato simples	-	18	-
Superfosfato triplo	-	41	-
Cloreto de potássio	-	-	58
Sulfato de potássio	-	-	48
Formulação NPK 4-14-8	4	14	8
Formulação NPK 4-30-16	4	30	1

Fonte: Adaptada de Amaro (2011)

A porcentagem média também é apresentada na matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e potássio na composição, com base na matéria seca dos principais adubos orgânicos que foram utilizados no estudo de Amaro (2011) no cultivo da pimenta, conforme a Tabela 3.

Tabela 3- Adubos orgânicos com base na matéria seca.

ADUBO	MO(%)	N(%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O(%)
<b>ORGÂNICO</b>				
Esterco bovino	57	1,7	0,9	1,4
Esterco de equino	46	1,4	0,5	1,7
Esterco suíno	53	1,9	0,7	0,4
Esterco ovinos	65	1,4	1,0	2,0
Esterco de aves	50	3,0	3,0	2,0
Composto orgânico	31	1,4	1,4	0,8

Fonte: Adaptada de Amaro (2011)

#### 4.6 CLASSIFICAÇÃO DOS FERTILIZANTES

Os fertilizantes são classificados em duas categorias principais: simples e compostos.

##### 4.6.1 Fertilizantes Simples

São aqueles que contêm apenas um macronutriente primário disponível para as plantas.

Dividem-se em três grupos:

Nitrogenados: Nitrato de amônio, ureia, sulfato de amônio e nitrocálcio.

Fosfatados: Superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (TSP) e termofosfato.

Potássicos: Sulfato de potássio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e cloreto de potássio (KCl).

#### 4.7 PRODUÇÃO INDUSTRIAL DO SUPERFOSFATO SIMPLES (SSP)

##### 4.7.1 Visão Geral do Processo

O Superfosfato Simples (SSP) é produzido industrialmente por meio da acidulação da rocha fosfática com ácido sulfúrico, seguida das etapas de preparo da rocha através de purificação (flotação), redução do diâmetro da partícula (britagem ou moagem) e preparo do tanque de polpa geralmente 70% de sólidos, determinação da R.A, reação, solidificação, cura, beneficiamento, granulação e expedição.

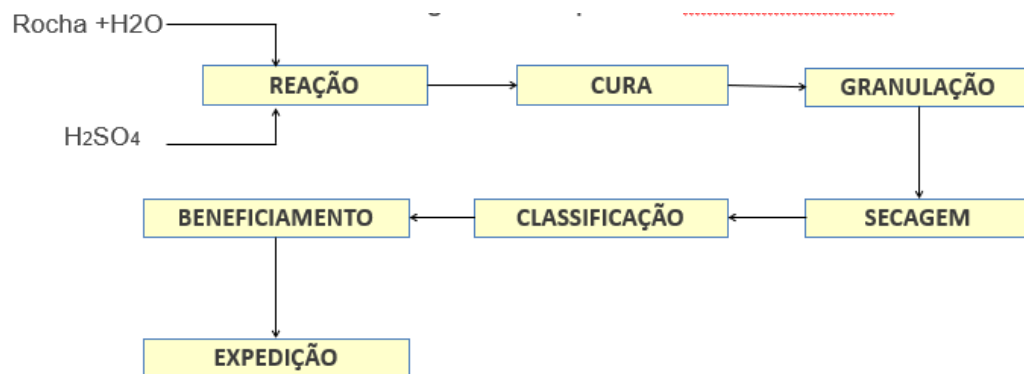
O objetivo do processo é converter o fosfato tricálcico insolúvel presente na rocha em fosfato monocálcico solúvel em água e fosfato bicálcico solúvel em Citrato neutro de amônio (CNA ou SCAN), forma assimilável pelas plantas (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

O processo industrial de produção de Super Fosfato Simples (SSP) e Super Fosfato Triplo (TSP) pode ser dividido nas seguintes etapas, conforme a Figura 3.

Processo de Acidulação:

1. Preparação das matérias-primas.
2. Dosagem e controle da razão de acidulação.
3. Reação no misturador (Paddle Mixer).
4. Reação e solidificação na correia enclausurada (DEN).
5. Desintegração do material.
6. Cura.
7. Beneficiamento (peneiramento e/ou granulação).

Figura 3- Fluxograma do processo de Fabricação.



Fonte: VITOR; CAGLIARI JÚNIOR (2012)

A produção industrial do SSP é um processo contínuo, heterogêneo e fortemente dependente de:

- ✓ Cinética de reação;
- ✓ Fenômenos de difusão;

- ✓ Controle térmico;
- ✓ Propriedades físicas da massa reacional.

A eficiência global do processo depende da maximização da conversão no estágio fluido e da minimização da acidez residual, fatores diretamente relacionados à redução do tempo de cura.

#### 4.7.2 Armazenamento e expedição

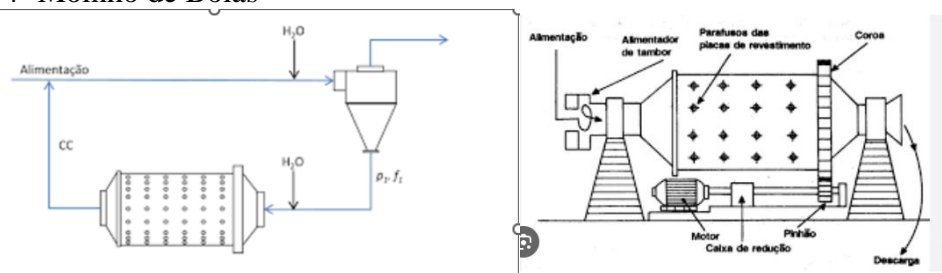
#### 4.7.3 Rocha Fosfática:

A rocha fosfática deve apresentar:

- ✓ Teor adequado de  $P_2O_5$  total;
- ✓ Granulometria controlada (maior área superficial → maior velocidade de reação);
- ✓ Umidade controlada;
- ✓ Baixo teor de impurezas reativas ( $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , carbonatos).

O moinho de bolas que são muito utilizados no processo de redução do diâmetro das partículas industriais, conforme demonstrado na Figura 04.

Figura 4 -Moinho de Bolas



Fonte: Silva, Juliana (2014)

A rocha é previamente:

- Britada;
- Moída;

- Seca (teor de umidade controlada);
- Classificada granulometricamente, diâmetro da partícula padronizado ;
- Armazenada em silos dosadores.
- Se o processo for base úmida, e armazenado em um taque com agitação constante e teor de sólidos controlados.

A granulometria exerce forte influência cinética, pois a velocidade de reação é proporcional à área superficial específica da partícula (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

#### **4.7.4 Ácido Sulfúrico.**

O ácido sulfúrico utilizado apresenta concentração típica entre 93e98%, devendo-se controlar:

- ✓ Concentração;
- ✓ Densidade;
- ✓ Temperatura;
- ✓ Vazão mássica.

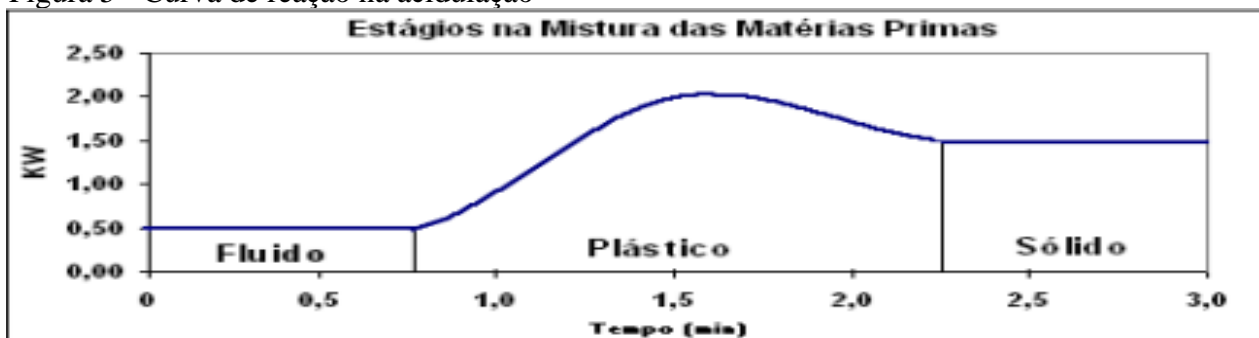
A concentração influencia diretamente:

- ✓ A viscosidade da fase líquida;
- ✓ O coeficiente de difusão;
- ✓ A taxa de reação;
- ✓ A formação de sulfato de cálcio.

A dosagem de ácido sulfúrico e Controle da Razão de Acidulação (RA) e diluição do sulfúrico para processo são aferidos constantemente durante o processo.

No processo de acidulação entre o reator e demister a rocha em reação com o ácido sulfúrico passa por três etapas de reação onde é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Curva de reação na acidulação



Fonte: VITOR; CAGLIARI JÚNIOR (2012)

A Razão de Acidulação (RA) é definida conforme Equação 01.

$$RA = \frac{\text{massa de H}_2\text{SO}_4}{\text{massa de rocha fosfática seca}} \quad (01)$$

Valor típico industrial:

$$RA \approx 0,45 \text{ a } 0,75$$

E a diluição vai depender da concentração do ácido sulfúrico, em um H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 98,50% de concentração, e com a diluição de 65% no reator em seria adicionado 65% de ácido e 35 % de água industrial(VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

O controle da RA e da diluição do ácido sulfúrico é fundamental porque influência:

- ✓ Conversão química;
- ✓ Teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel;
- ✓ Acidez livre residual;
- ✓ Custo do produto.

Desvios na RA e na diluição do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> podem provocar:

- ✓ Subacidulação → baixa conversão, baixa reação;
- ✓ Superacidulação → tixotropia ( baixa tensão superficial), rocha encapsulada, reação incompleta (aspecto de melado), excesso de acidez livre e empedramento.

## 4.8 BALANÇO DE MASSA GLOBAL DO PROCESSO SSP

### 4.8.1 Sem adição de calcário:

O processo considera apenas a **rocha fosfática (m<sub>R</sub>)** e o **ácido sulfúrico (m<sub>S</sub>)**.

- A massa final do SSP é dada conforme na Equação (02):

$$m_{SSP} = m_R + m_S \quad (02)$$

- A **Razão de Acidulação (RA)** é definida como Equação (03):

$$RA = \frac{m_S}{m_R} \quad (03)$$

- Substituindo as Equações (02) e (03) temos a Equação (04)

$$m_{SSP} = m_R(1 + RA) \quad (04)$$

- Nesse caso, o balanço é direto: toda a massa do produto resulta da soma da rocha e do ácido, sem interferência de outros componentes.

### 4.8.2 Com adição de calcário antes da acidulação:

Aqui, além da rocha fosfática e do ácido sulfúrico, considera-se a massa de calcário adicionada ( $m_C$ ).

A massa final do SSP modificado conforme Equação (05)

$$m_{SSP} = m_R + m_S + m_C \quad (05)$$

A Razão de Acidulação continua sendo calculada em função da rocha e do ácido definida como Equação (03):

$$RA = \frac{m_S}{m_R} \quad (03)$$

O calcário atua como **agente inerte**, alterando o balanço global de massa e influenciando a neutralização da acidez residual.

O produto final tende a apresentar:

- ✓ menor acidez livre,
- ✓ maior estabilidade química,
- ✓ estrutura física mais porosa e estável.

Em resumo:

- ✓ **Sem calcário:**

$$m_{SSP} = m_R + m_S \quad (02)$$

- ✓ **Com calcário:**

$$m_{SSP} = m_R + m_S + m_C \quad (05)$$

### 4.8.3 Razão de Acidulação (RA)

A **Razão de Acidulação (RA)** é um parâmetro fundamental no processo de produção do superfosfato simples (SSP), pois relaciona diretamente a quantidade de ácido sulfúrico utilizada com a massa de rocha fosfática empregada.

Matematicamente, é definida como:

$$RA = \frac{m_S}{m_R} \quad (03)$$

Onde:

- $m_S$  = massa de ácido sulfúrico adicionada.
- $m_R$  = massa de rocha fosfática seca.

Assim, a massa final do SSP pode ser expressa conforme Equação (04):

$$m_{SSP} = m_R(1 + RA) \quad (04)$$

#### 4.8.4 Importância da RA no processo

O controle adequado da RA é essencial porque influencia diretamente:

**Conversão química:** determina a eficiência da reação entre o ácido e a rocha, impactando a formação de fosfatos solúveis.

**Acidez residual:** valores inadequados de RA podem resultar em excesso de acidez livre no produto final, prejudicando sua estabilidade.

**Teor de  $P_2O_5$  solúvel:** a disponibilidade agronômica do fósforo depende do equilíbrio entre ácido e rocha, regulado pela RA.

Em resumo: A RA funciona como um índice de dosagem que garante o balanço estequiométrico entre ácido e rocha. Um valor bem ajustado assegura maior eficiência química, menor acidez residual e melhor qualidade agronômica do fertilizante.

#### 4.9 REAÇÃO NO MISTURADOR (PADDLE MIXER)

Em base seca:

A rocha fosfática o ácido sulfúrico e a água industrial são alimentados simultaneamente em um reator de mistura contínua do tipo **Paddle Mixer Figura 6**, onde e feito um cálculo de solubilidade do ácido sulfúrico (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

Em base úmida:

A polpa fosfática (polpa de rocha e água industrial) e o ácido sulfúrico são alimentados simultaneamente em um reator de mistura contínua do tipo **Paddle Mixer Figura 6**, atualmente o mais utilizado (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

Figura 6 -Reator Paddle Mixer



Fonte: Blenders/paddle-blenders (2022)

#### 4.9.1 Funções do misturador:

- ✓ Promover contato íntimo entre reagentes;
- ✓ Iniciar a reação exotérmica;
- ✓ Formar uma massa reacional homogênea;
- ✓ Controlar o início da plasticidade do material.

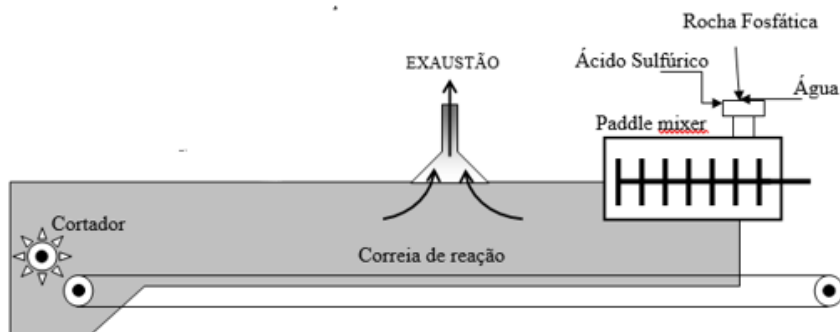
#### 4.9.2 Principais fenômenos nessa etapa:

- ✓ Formação de fosfato monocálcico e bicálcico;
- ✓ Formação de sulfato de cálcio (gesso);
- ✓ Liberação de calor;
- ✓ Liberação de gases fluorados ( $\text{SiF}_4$ ).
- ✓

O tempo de residência no misturador é curto (segundos a poucos minutos), suficiente apenas para iniciar a reação (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

#### 4.10 REAÇÃO E SOLIDIFICAÇÃO NA CORREIA DEN (DEMISTER).

Figura 7- Demister industrial



Fonte: VITOR; CAGLIARI JÚNIOR (2012)

Após a reação exotérmica no misturador (reator), a massa reacional com temperatura elevada e ainda sob reação química é descarregada sobre uma correia transportadora enclausurada, conhecida como **DEN**( Demister) onde tem a finalidade de completar a reação de ataque ácido, rocha, conforme Figura 7.

Após o reator, ocorrerá três estágios físicos sucessivos, onde apresentado na Figura 5:

1. Estágio fluido
2. Estágio plástico
3. Estágio sólido

Reações esperadas predominantes do processo:

- Continuação da reação ácido-rocha;
- Evaporação parcial de água;
- Formação de cristais de sulfato de cálcio;
- Solidificação progressiva da massa.

A correia (Demister) é enclausurada para:

- Confinar gases (SiF<sub>4</sub>, vapores ácidos);
- Direcionar gases ao sistema de lavagem, onde é beneficiado e retirado um subproduto SiF<sub>4</sub>;
- Proteger operadores e meio ambiente.

O controle do tempo de residência no DEN é crítico para maximizar a conversão ainda na fase fluida para a sólida, este tempo pode variar de 8 a 12 minutos.

#### 4.11 MODELAGEM CINÉTICA FORMAL

A reação de acidulação pode ser tratada como um sistema heterogêneo sólido-líquido, no qual a cinética é governada por:

1. Reação química na interface;
2. Difusão do ácido através da camada de produto formada.

#### 4.12 MODELO DO NÚCLEO NÃO REAGIDO (SHRINKING CORE MODEL)

Para partículas aproximadamente esféricas de rocha fosfática:

Controle por reação química superficial conforme Equação (06)

$$1 - (1 - X)^{1/3} = k_r t \quad (06)$$

Onde:

- ✓  $X$  = conversão da rocha;
- ✓  $k_r$  = constante cinética de reação;
- ✓  $t$  = tempo;

Digite a equação aqui.

Controle por difusão através da camada de produto (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012) conforme Equação (07)

$$1 - \frac{3}{(1-X)^{2/3}} + 2(1-X) = k_d t \quad (07)$$

Onde:

- ✓  $X$  = conversão da rocha;
- ✓  $k_r$  = constante cinética de reação;
- ✓  $k_d$  = constante cinética difusional;
- ✓  $t$  = tempo;

Durante a etapa fluida (no DEN), predomina controle químico.

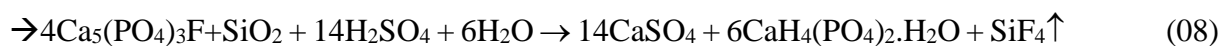
Durante a cura, predomina controle difusional.

#### 4.13 REAÇÕES QUÍMICAS NA PRODUÇÃO DE SSP E TSP

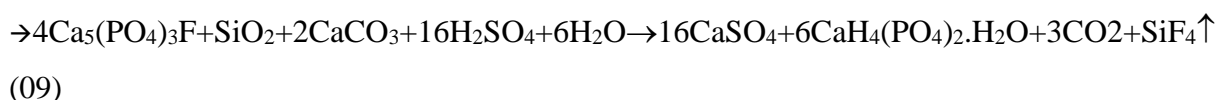
O objetivo fundamental na fabricação dos fertilizantes superfosfato simples (SSP) e superfosfato triplo (TSP) é a transformação do fosfato tricálcico ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , insolúvel) presente na rocha fosfática em fosfato monocálcico ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , solúvel em água). Esse processo é obtido por meio da acidulação da rocha com diferentes ácidos, conforme descrito por Adriano Barbosa Victor no livro Produção de fertilizantes na Fosfertil (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

Reações principais:

- SSP – Acidulação com ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), Equação (08) :



- SSP +  $\text{CaCO}_3$  – Acidulação com ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), Equação (09):



Reações secundárias:

Durante o processo industrial, devido ao tempo de reação e à presença de impurezas na rocha fosfática e no ácido fosfórico, ocorrem reações secundárias, como (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012), Equações (10), (11) e (12):



Além disso, forma-se **tetrafluoreto de silício (SiF<sub>4</sub>)**, um gás nocivo que exige sistemas de captação e lavagem antes da liberação na atmosfera (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

A acidulação não ocorre de forma instantânea, mas sim por meio de etapas intermediárias, nas quais o ácido deve difundir-se através de uma camada líquida formada sobre a superfície da partícula da rocha fosfática. Esse mecanismo de difusão controla a velocidade da reação e explica a importância dos três estágios da massa reacional, também apresentado na Figura 4:

- Estágio fluído – maior contato entre reagentes, favorecendo a conversão química.
- Estágio plástico – transição com evaporação da água e aumento da viscosidade.
- Estágio sólido – formação do produto, com cristalização dos sais.

A velocidade de reação ( $R$ ) é então proporcional à área da superfície da rocha ( $S$ ), do coeficiente de difusão de ácido através da camada que recobre a partícula de rocha ( $D$ ) e a concentração do ácido ( $A$ ). A velocidade de reação é, portanto, inversamente proporcional à espessura do filme ( $Y$ ), conforme Equação (13)

$$R \propto \frac{S \cdot D \cdot A}{Y} \quad (13)$$

Esse modelo indireto mostra que a eficiência da acidulação depende do equilíbrio entre variáveis físico-químicas, especialmente a viscosidade do ácido fosfórico, que aumenta com a concentração e reduz a difusão.

Assim, a máxima velocidade é atingida em torno de 48% de concentração de  $H_3PO_4$ , antes de iniciar o decréscimo (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

#### 4.14 DESINTEGRAÇÃO

Ao final da correia, o material já se encontra sólido e é submetido a:

- ✓ Cortador de grumos;
- ✓ Quebra mecânica primária.

O objetivo é:

- ✓ Reduzir o tamanho de blocos formados;
- ✓ Facilitar manuseio e transporte;
- ✓ Preparar o material para a etapa de cura.

#### 4.15 CURA:

A etapa de cura constitui uma fase crítica no processo de produção do superfosfato simples (SSP), sendo responsável pela continuidade e finalização das reações iniciadas durante a acidulação da rocha fosfática com ácido sulfúrico. Após a reação inicial, o material é disposto em galpões de cura, conforme ilustrado na **Figura 8**, onde permanece por períodos que variam tipicamente entre 5 e 15 dias, dependendo das condições operacionais e da formulação adotada.

Durante esse período, o sistema permanece reacionalmente ativo, ocorrendo uma série de transformações físico-químicas fundamentais para a qualidade final do fertilizante. Entre os principais fenômenos envolvidos, destacam-se a difusão do ácido residual, a continuidade da reação com partículas não reagidas, a redução da acidez livre, a evolução da umidade e o aumento progressivo da conversão de  $P_2O_5$  total em formas assimiláveis (CNA), além da estabilização estrutural do material.

Do ponto de vista cinético, a etapa de cura apresenta comportamento não linear, caracterizado por uma fase inicial de alta taxa reacional, seguida por um regime de desaceleração até a estabilização. Essa dinâmica pode ser associada a mecanismos combinados de **reação química e difusão**, nos quais, inicialmente, o sistema é controlado pela

disponibilidade de ácido e superfície reativa, e, posteriormente, pela limitação difusional no interior da matriz sólida.

Os dados experimentais obtidos neste estudo corroboram esse comportamento. Aos 3 dias de cura, já se observa avanço significativo da conversão, porém ainda com presença de acidez residual elevada e maior teor de umidade, indicando sistema em fase ativa de reação. Aos 5 dias, verifica-se um ponto crítico de transição: as formulações com adição de calcário (3% e 5%) atingem conversões de aproximadamente 86,64% e 87,22%, respectivamente, superiores à amostra branca (83,96%), além de apresentarem menores teores de acidez e umidade ( $\approx 12,45\%$  e  $4,07\%$  para 3%, e  $11,86\%$  e  $3,89\%$  para 5%), evidenciando maior avanço da estabilização.

Já aos 9 dias, observa-se a consolidação do sistema, com as formulações contendo calcário atingindo conversões de 91,97% (3%) e 91,46% (5%), enquanto a amostra branca permanece inferior (85,62%), indicando que, mesmo com maior tempo de cura, o sistema convencional apresenta menor eficiência de conversão. Esse comportamento confirma que a maior contribuição cinética ocorre nos primeiros dias, com ganhos marginais após o quinto dia.

A análise conjunta dos dados permite inferir que a etapa de cura pode ser descrita, de forma simplificada, por um modelo cinético de ordem aparente com limitação difusional em estágios finais, no qual a taxa de reação decresce com o consumo do ácido e a redução da acessibilidade aos reagentes. Nesse contexto, a adição de calcário atua como agente modificador do sistema, influenciando o equilíbrio ácido-base, reduzindo a acidez residual e favorecendo a progressão da reação em menor tempo.

Apesar de sua importância, a etapa de cura representa um dos principais gargalos industriais, uma vez que exige grandes áreas de estocagem, tempo elevado de permanência do material e impacta diretamente o fluxo produtivo. A configuração física observada nos galpões de cura (Figura 7), com grandes pilhas de material, evidencia essa limitação logística e reforça a necessidade de otimização do processo.

Dessa forma, a antecipação da estabilização química do sistema, observada especialmente nas formulações com 3% e 5% de calcário, demonstra que é possível reduzir significativamente o tempo de cura — de nove para aproximadamente cinco dias — sem prejuízo da qualidade do produto. Essa redução representa um ganho expressivo em termos de eficiência industrial, diminuindo custos operacionais, necessidade de área e tempo de imobilização do produto.

Portanto, a etapa de cura deve ser compreendida não apenas como uma fase passiva de armazenamento conforme figura 08, mas como um sistema dinâmico governado por fenômenos cinéticos e difusionais, cuja otimização é fundamental para o avanço tecnológico na produção de fertilizantes fosfatados (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012).

Figura 8 - Galpão de cura do Fosfato Super simples.



Fonte : o autor (2026)

#### 4.16 BENEFICIAMENTO

Após a cura, o produto pode seguir dois caminhos SSP Farelo e SSP Granulado (VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012):

##### a) SSP Farelo etapas:

- ✓ Peneiramento;
- ✓ Ajuste granulométrico;
- ✓ Expedição direta.

##### b) SSP Granulado etapas:

- ✓ Alimentação em tambor granulador;
- ✓ Secagem;
- ✓ Resfriamento;

- ✓ Peneiramento;
- ✓ Reciclo de finos.

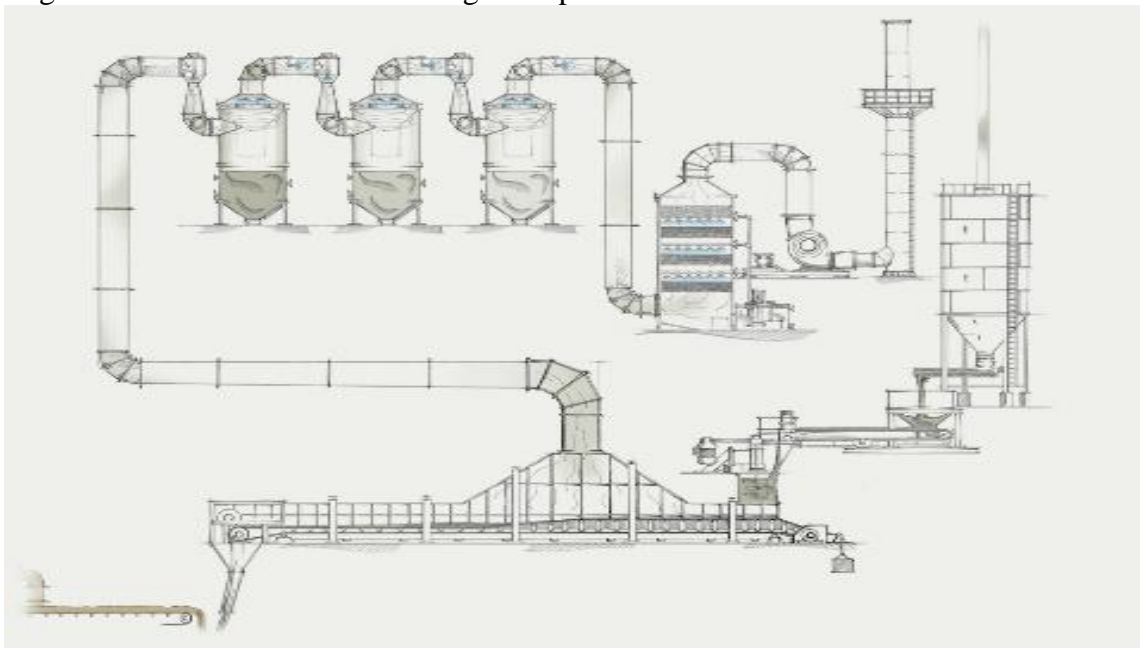
#### 4.17 CONTROLE AMBIENTAL

Os gases gerados (principalmente  $\text{SiF}_4$ ) são captados no sistema enclausurado e enviados para, ( VITOR; CAGLIARI JÚNIOR, 2012);

- ✓ Lavadores de gases (scrubbers), representado na Figura 9;
- ✓ Sistemas de neutralização;
- ✓ Tratamento antes da emissão atmosférica.

Essa etapa é essencial para atendimento à legislação ambiental.

Figura 9 - Sistema de lavadores de gases tipo Scrubbers



Fonte : XICHENG EP(CN) LTD (2026)

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 MATERIAIS

Foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos, conforme demonstrado na Figura 9;

- Furadeira elétrica com controle de rotação;
- Haste de agitação em aço inoxidável;
- Reator de bancada com massa previamente determinada;
- Balança semi-analítica ( $\pm 0,01$  g);
- Cronômetro digital;
- Termômetro;
- Estufa com circulação de ar ( $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- Estufa com circulação de ar ( $70\text{--}85\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- Béquer de vidro (100 mL);
- Béquer de polipropileno (250 mL);
- Conta-gotas (5 mL);
- Espátula metálica;
- Paquímetro;
- Peneiras granulométricas (#100, #200 e #325);
- Fundo de peneira;
- Frascos de polietileno para cura;
- Equipamentos de proteção individual (EPI).

#### 5.1.1 Insumos

Os insumos utilizados foram:

- Rocha fosfática com 100% passante na malha especificada (#100) e umidade total inferior a 0,5%;
- Calcário (quando aplicável), com umidade inferior a 0,5%;

- Ácido sulfúrico concentrado (98%);
- Água à temperatura ambiente (25 °C).

## 5.2 METODO

### 5.2.1 Procedimento experimental de acidulação em escala de bancada

O procedimento experimental de acidulação de rocha fosfática em escala de bancada foi desenvolvido especificamente para esta pesquisa, visando simular as condições industriais de produção de superfosfato simples (SSP) sob condições controladas de laboratório.

### 5.2.2 Fluxograma de acidulação em bancada:

- PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL:
  - Definição dos objetivos do estudo.
  - Seleção das variáveis.
  - Criação das planilhas ( Controle de processo, cálculo analítico e gráficos).
  - Razão de acidulação (RA).
  - Teor de calcário (0%, 3%, 5%, 7%).
  - Diluição do ácido.
  - Granulometria da rocha – passante na peneira de 100 mash.
  - Definição dos pontos de avaliação (Imediato, 1, 3, 5, 7 e 9 dias).
- PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS:
  - Caracterização da rocha fosfática.
  - Preparação do ácido sulfúrico (diluição).
  - Pesagem dos reagentes.
  - Preparação do calcário (quando aplicável).
- ETAPA DE ACIDULAÇÃO (REATOR DE BANCADA):
  - Mistura rocha + ácido (controle de RA).
  - Adição controlada de calcário.
  - Homogeneização da massa reacional.
  - Formação da pasta de SSP.
- TRANSFERÊNCIA PARA CURA:

- Moldagem/armazenamento do material.
- Identificação das amostras.
- ETAPA DE ANÁLISE DA CURA (Imediato, 1, 3, 5, 7 e 9 dias):
  - Reação ácido-rocha residual.
  - Difusão do ácido.
  - Redução da acidez.
  - Evolução da umidade.
  - Aumento da conversão de  $P_2O_5$ .
- ANÁLISES LABORATORIAIS:
  - $P_2O_5$  Total.
  - $P_2O_5$  solúvel (CNA +  $H_2O$ ).
  - $P_2O_5$  solúvel ( $H_2O$ ).
  - Umidade.
  - Acidez residual.
  - Cálculo da conversão (CNA/ $P_2O_5$  Total).
- TRATAMENTO DE DADOS:
  - Organização em planilhas.
  - Cálculo de médias e variações.
  - Comparação entre formulações.
- ANÁLISE GRÁFICA:
  - Conversão × tempo.
  - Umidade × tempo.
  - Acidez × tempo.
  - Comparação (Branco × 3% × 5% × 7%).
- INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS:
  - Avaliação da cinética de reação.
  - Identificação do ponto de estabilização.
  - Análise do efeito do calcário.
- CONCLUSÃO E ELABORAÇÃO DO PROJETO:
  - Análise gráfica, física e visual.
  - Definição da melhor condição (3–5%).
  - Metodologia, Resultados e Discursão e Considerações finais.

### 5.2.3 Delineamento experimental

Definição da Razão de Acidulação (R.A.):

A Razão de Acidulação (R.A.) foi definida como a relação entre a massa de ácido sulfúrico e a massa de rocha fosfática utilizada no ensaio.

As R.A. avaliadas foram previamente calculadas com base na estequiometria da reação e ajustadas experimentalmente quando necessário, considerando o aspecto físico final do produto.

#### DEFINIÇÃO DE DILUIÇÃO DE ACIDOS

A diluição do ácido sulfúrico foi determinada em função:

- ✓ da umidade da rocha;
- ✓ da concentração do ácido;
- ✓ da consistência desejada da polpa reacional.

### 5.2.4 Condições de segurança e controle ambiental

Todo o procedimento foi realizado sob capela de exaustão, em conformidade com as normas de segurança química. Foram observadas as recomendações contidas nas Fichas de Dados de Segurança (FDS) dos reagentes, bem como as diretrizes internas de descarte de resíduos e uso obrigatório de EPI.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Foram realizado quatro experimentos, sendo o primeiro denominado branco que consiste

### 6.1 PROCEDIMENTO OPERACIONAL

Preparação das amostras, conforme Figura 10:

- a) Secagem prévia da rocha até umidade  $< 0,5\%$ ;
- b) Regulagem da estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- c) Cálculo das massas dos reagentes;
- d) Pesagem individual da rocha, calcário (quando aplicável), ácido e água;
- e) Determinação da massa inicial do reator.

Figura 10 - kit o procedimento de acidulação



Fonte : o autor (2026)

### 6.1.1 Etapa de reação

- a) Inserção da rocha no reator;
- b) Adição de água e formação da polpa sob agitação mecânica;
- c) Adição do ácido sulfúrico em até 10 segundos, com acionamento simultâneo do cronômetro;
- d) Manutenção da agitação por 30 segundos em alta rotação;
- e) Interrupção da agitação.

### 6.1.2 Avaliação imediata

- ✓ Aspecto físico (seco, úmido ou pastoso);
- ✓ Coloração;
- ✓ Homogeneidade;
- ✓ Observações qualitativas.

Conforme a Figura 10, temos na sequência branco amostra somente com rocha, 3% de calcário, 5% de calcário e 7% de calcário e as Figura 11 e Figura 12 demonstram os mesmos SSP após 24h de cura.

Figura 11 - Super Simples pós acidulação



Fonte : o autor (2026)

Figura 12 - Super Simples pós acidulação 1 dia de cura



Fonte : o autor (2026)

### 6.1.3 Avaliação estrutural

O material foi desenformado e analisado quanto a:

- ✓ Formação de poros;
- ✓ Dureza dos grumos;
- ✓ Presença de blocos maciços;
- ✓ Comportamento tixotrópico

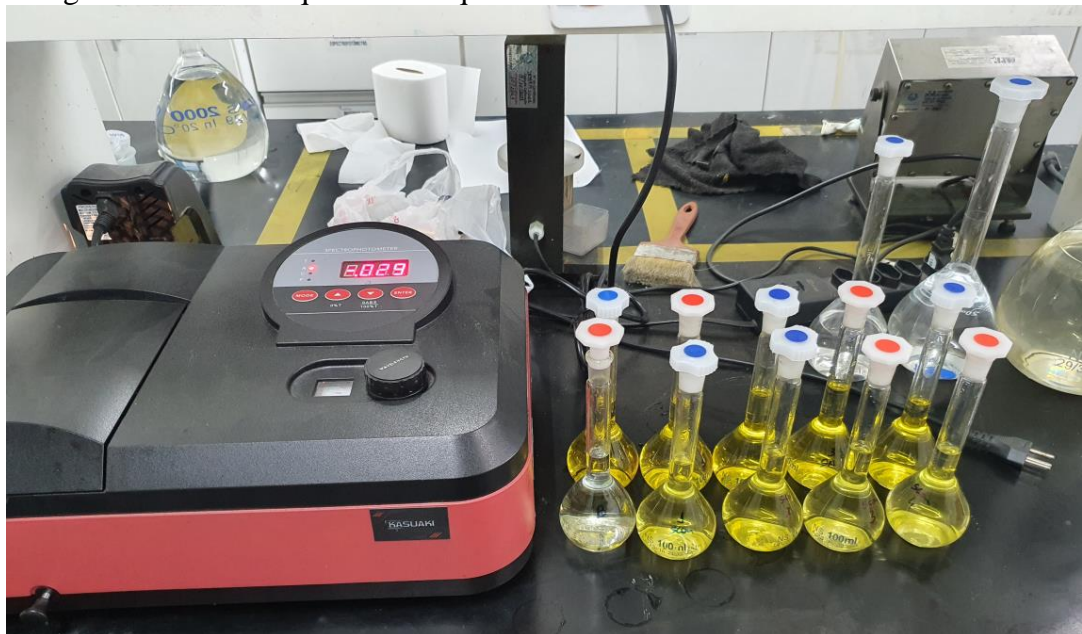
#### 6.1.4 Análises químicas

##### Análise Química:

Determinações analíticas, onde na Figura 13 e demonstrado como e realizada as análises de fosforo expressa em  $P_2O_5$ .

- ✓ %  $P_2O_5$  total;
- ✓ %  $P_2O_5$ solúvel em CNA;
- ✓ %  $P_2O_5$ solúvel em água

Figura 13 - Análise quantitativa química da cura.



Fonte: O autor (2026)

#### 6.1.5 Cura:

As amostras foram acondicionadas em Erlenmeyer e mantidas em estufa entre 65 a 75 °C por até 9 dias, como demonstrado nas Figuras 14 e 15.

Foram realizadas análises nos tempos:

- ✓ Imediato (0 dia);
- ✓ 1º dia;
- ✓ 3º dia;
- ✓ 5º dia;
- ✓ 7º dia;
- ✓ 9º dia.;

Figura 14 - Processo de cura em laboratório



Fonte: O autor (2026)

Figura 15 - Super Simples após os 9 dias de cura



Fonte: O autor (2026)

### 6.1.6 Tratamento dos dados

Os dados experimentais de conversão, acidez e umidade foram organizados em planilha eletrônica e apresentado na **Tabela 4**:

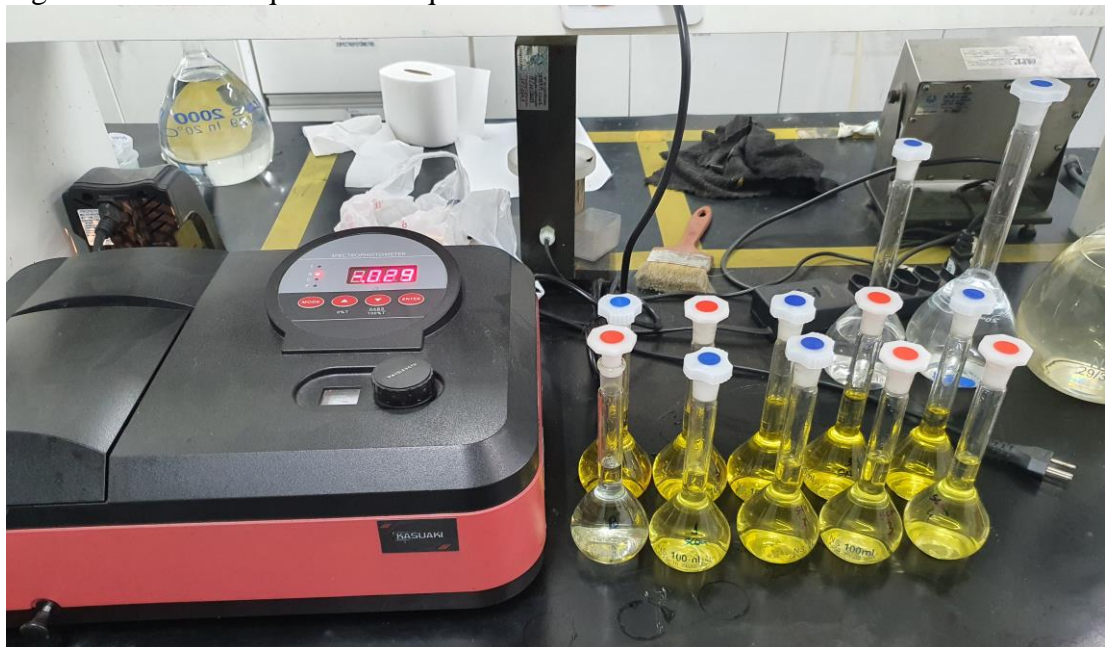
- ✓ Análises gráficas;
- ✓ Interpretação técnica da eficiência de reação e comportamento durante a cura

Tabela 4 - Análise das amostras, Branco, 3%, 5% e 7% de calcário.

. Determinações analíticas, onde na Figura 13 e demonstrado como e realizada as análises de fosforo expressa em  $P_2O_5$ .

- ✓ %  $P_2O_5$  total;
- ✓ %  $P_2O_5$ solúvel em CNA;
- ✓ %  $P_2O_5$ solúvel em água;
- ✓ Umidade;
- ✓ Acidez livre

Figura 16 - Análise quantitativa química da cura



Fonte: O autor (2026)

## Controle do processo

R.A:	055	Conc.H2SO4:	98,70%	Data:06/02/2026	Rechea: Fosfato natural Reativo	Calcario: Vite
Branco						
Parametro/Análise:	Imediato	1º dia	3º dia	5º dia	7º dia	9º dia
P205 Total	12,55	13,18	13,87	13,91	14,08	14,09
P205 Total Bs	14,69	14,62	14,73	14,59	14,65	14,64
P205 SCAN + H2O	8,31	9,18	10,13	11,79	11,99	12,07
P205 SCAN + H2O Bs	9,73	10,18	10,76	12,36	12,48	12,53
P205 H2O	6,34	7,48	8,41	8,77	8,91	8,96
P205 H2O Bs	7,42	8,30	8,93	9,20	9,27	9,30
Acidez	47,06	38,16	25,02	19,29	17,65	16,28
Umidade	14,59	9,85	5,88	4,66	3,87	3,72
Conversão P205 SCAN/P205 Total	66,24%	69,67%	73,02%	84,74%	85,17%	85,62%
Conversão P205 H2O/P205 Total	50,51%	56,80%	60,63%	63,07%	63,26%	63,55%
Conversão P205 SCAN/P205 H2O	76,26%	81,53%	83,03%	74,42%	74,27%	74,22%
5% de Inerte						
Parametro/Análise:	Imediato	1º dia	3º dia	5º dia	7º dia	9º dia
P205 Total	11,96	12,64	13,48	13,71	13,92	13,97
P205 Total Bs	13,57	13,83	14,25	14,28	14,38	14,42
P205 SCAN + H2O	7,74	8,74	10,15	11,86	12,40	12,78
P205 SCAN + H2O Bs	8,78	9,57	10,73	12,35	12,81	13,19
P205 H2O	5,92	7,42	9,31	9,96	10,14	10,36
P205 H2O Bs	6,71	8,12	9,84	10,37	10,48	10,70
Acidez	28,29	22,30	18,71	11,86	9,74	9,14
Umidade	11,89	8,63	5,38	3,98	3,21	3,14
Conversão P205 SCAN/P205 Total	64,72%	69,21%	75,29%	86,48%	89,10%	91,46%
Conversão P205 H2O/P205 Total	49,48%	58,73%	69,08%	72,63%	72,85%	74,17%
Conversão P205 SCAN/P205 H2O	76,45%	84,85%	91,75%	83,99%	81,77%	81,09%
7% de Inerte						
Parametro/Análise:	Imediato	1º dia	3º dia	5º dia	7º dia	9º dia
P205 Total	12,02	12,58	13,39	13,61	13,82	13,92
P205 Total Bs	13,59	13,74	14,14	14,16	14,27	14,36
P205 SCAN + H2O	7,70	8,67	10,09	11,82	12,25	12,49
P205 SCAN + H2O Bs	8,71	9,47	10,65	12,30	12,65	12,89
P205 H2O	5,76	7,10	9,37	10,18	10,31	10,44
P205 H2O Bs	6,52	7,75	9,90	10,59	10,65	10,77
Acidez	22,93	16,55	17,70	11,52	9,67	9,11
Umidade	11,58	8,43	5,29	3,89	3,19	3,07
Conversão P205 SCAN/P205 Total	64,12%	68,91%	75,36%	86,87%	88,62%	89,74%
Conversão P205 H2O/P205 Total	47,95%	56,40%	70,01%	74,79%	74,59%	74,97%
Conversão P205 SCAN/P205 H2O	74,78%	81,85%	92,90%	86,10%	84,17%	83,54%

Fonte: O autor (2026)

#### Considerações Iniciais sobre o Processo de Acidulação -Tabela 4

O processo de acidulação foi conduzido em 06 de fevereiro de 2026, sendo avaliadas quatro formulações: amostra branca (referencial) e amostras contendo 3%, 5% e 7% de calcário incorporado à rocha fosfática..

Na avaliação imediata (tempo zero), todas as amostras apresentaram aspecto viscoso e comportamento tixotrópico, característico de elevada umidade e acidez residual. Esse comportamento é típico do superfosfato simples recém-acidulado, no qual a reação entre o ácido sulfúrico e a rocha fosfática ainda não se encontra plenamente estabilizada.

Observou-se, nesse momento inicial:

- ✓ Elevada acidez residual;
- ✓ Altos teores de umidade;
- ✓ Baixa conversão de  $P_2O_5$  (CNA/Total);
- ✓ Conversão ligeiramente superior na amostra branca.

Esses resultados indicam que a etapa de cura é determinante para a evolução das reações secundárias e consolidação do fosfato monocálcico solúvel.

#### 6.2 EVOLUÇÃO DA UMIDADE DURANTE A CURA

Verificou-se na Tabela 4 redução progressiva da umidade em todas as formulações ao longo dos nove dias de acompanhamento, conforme apresentado no Gráfico 1,

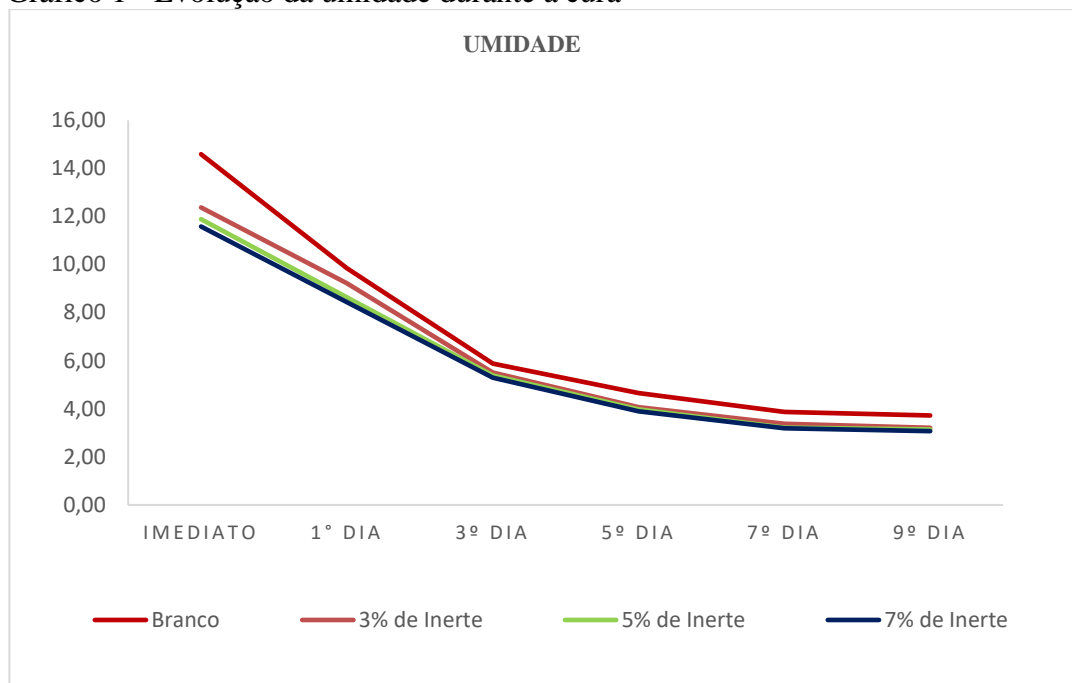
A amostra branco apresentou redução de 14,59% para 3,72%, enquanto as amostras contendo calcário apresentaram valores finais inferiores a 3,3% (Tabela 4 e Gráfico 1)

A menor umidade inicial (Tabela 4 em amarelo) nas amostras com calcário sugere que a presença de carbonato de cálcio contribui para:

- ✓ Melhor estruturação da massa reacional;
- ✓ Redução da retenção de água livre;
- ✓ Maior estabilidade física do material durante a cura.

Esse comportamento pode estar associado à formação de sulfato de cálcio adicional e à melhoria na granulometria da massa reacional.

Gráfico 1 - Evolução da umidade durante a cura



Fonte: O autor (2026)

### 6.3 COMPORTAMENTO DA ACIDEZ RESIDUAL

A acidez residual apresentou queda acentuada ao longo do período de cura, Gráfico 2 e Tabela 4. A amostra branca iniciou com 47,06 e reduziu para 16,28 ao nono dia.

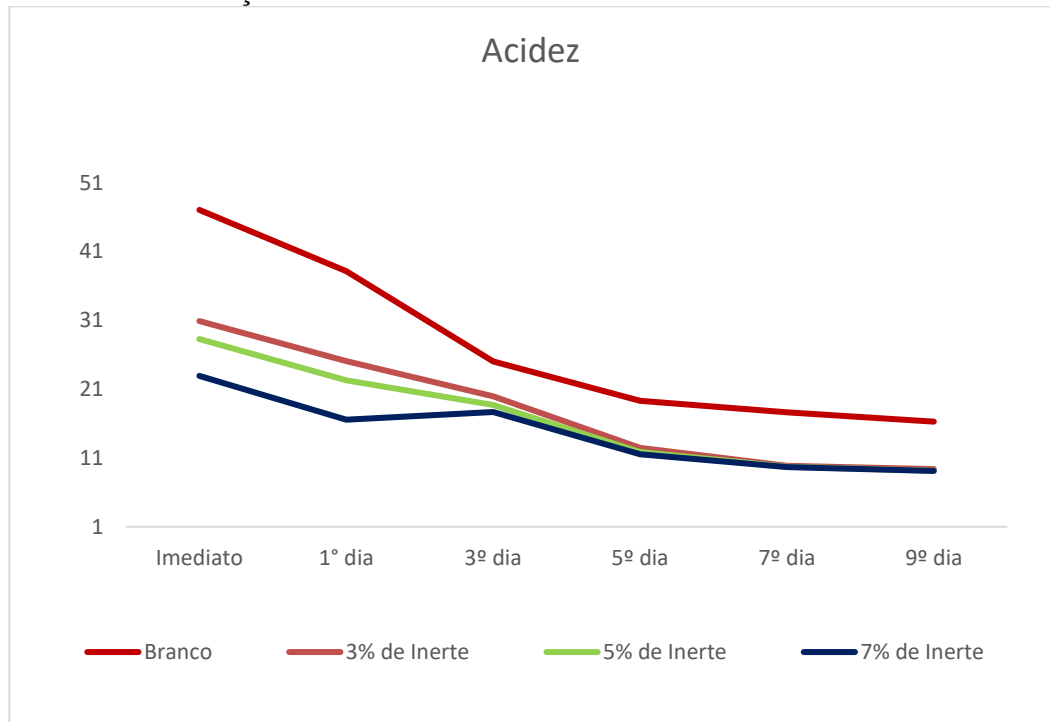
As amostras contendo calcário apresentaram valores iniciais significativamente menores, especialmente a amostra com 7%, que iniciou com 22,93 e reduziu para 9,11 (Gráfico 2 e Tabela 4).

A presença do calcário promove efeito tamponante, favorecendo:

- ✓ Neutralização parcial do ácido livre;
- ✓ Redução da agressividade química do produto;
- ✓ Melhoria da estabilidade durante a estocagem.

Esse comportamento é tecnicamente relevante sob a perspectiva industrial, pois reduz riscos operacionais e melhora as características finais do fertilizante

Gráfico 2 - Evolução da acidez durante a cura.



#### 6.4 CONVERSÃO DE $P_2O_5$ (CNA/TOTAL)

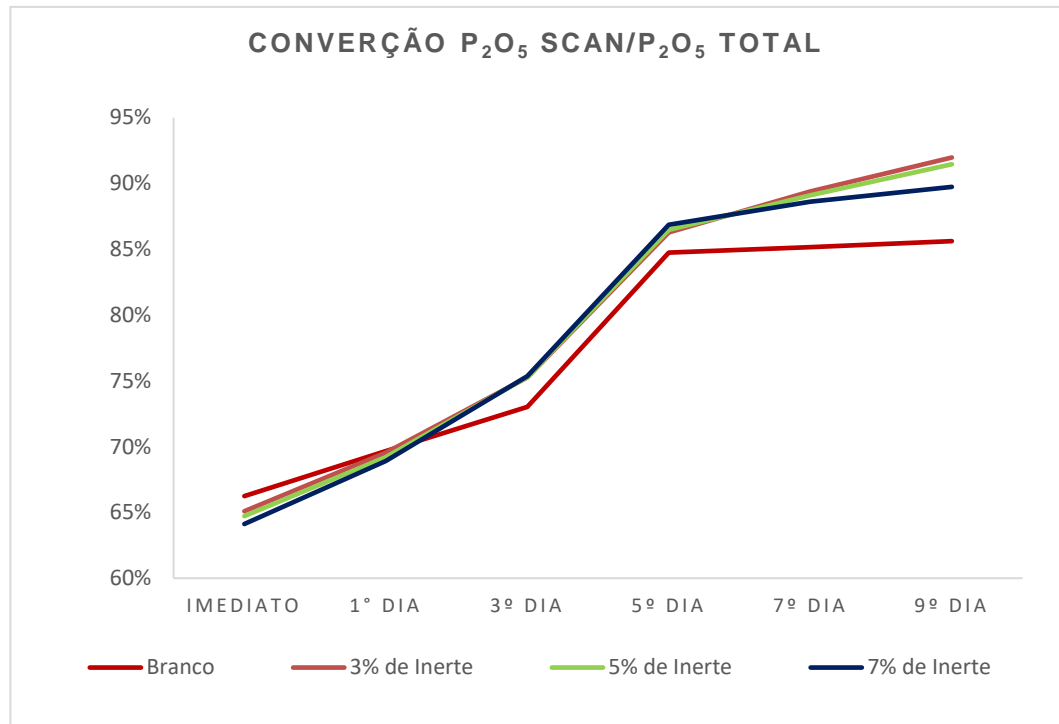
A variável mais representativa da eficiência do processo foi a conversão de  $P_2O_5$  solúvel (CNA/Total), conforme apresentado no Gráfico 3 e Tabela 4.

Observou-se que:

- ✓ No 5º dia, todas as formulações atingiram conversões superiores a 85%;
- ✓ As amostras com 3% e 5% de calcário ultrapassaram 91% no 9º dia;
- ✓ A amostra do branco estabilizou próxima a 86%.

A evolução da conversão indica que a maior taxa de transformação ocorre entre o 1º e o 5º dia de cura, havendo tendência de estabilização após esse período.

O ganho adicional entre o 5º e o 9º dia foi inferior a 5%, sugerindo aproximação ao equilíbrio reacional.

Gráfico 3 - Evolução conversão  $P_2O_5$  SCAN/Total durante a cura.

Fonte: O autor (2026)

## 6.5 EFEITO DO TEOR DE CALCÁRIO

A incorporação de calcário influenciou positivamente:

- ✓ A redução da acidez residual;
- ✓ A redução da umidade;
- ✓ A conversão final de  $P_2O_5$ .

Entretanto, observa-se na Tabela 4 e Gráficos 1,2 e 3, que a formulação com 7% apresentou conversão ligeiramente inferior às formulações com 3% e 5%, indicando possível excesso de inerte e diluição da fração reativa.

Dessa forma, os teores de 3% e 5% demonstraram melhor equilíbrio entre eficiência reacional e estabilidade química.

## 6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho demonstrou, de forma técnica e experimental, que a incorporação controlada de calcário à rocha fosfática constitui uma estratégia eficaz para modificação da dinâmica de reação no processo de acidulação destinado à produção de superfosfato simples.

Os resultados obtidos evidenciaram que a adição de 3% e 5% de calcário promoveu melhoria simultânea em três parâmetros críticos do processo: redução da acidez residual, diminuição mais rápida da umidade e aumento da conversão de  $P_2O_5$  solúvel (CNA/Total). Tais formulações superaram o desempenho da amostra referencial (branco), atingindo conversões superiores a 91% ao final do período avaliado, com maior estabilidade química.

A análise da evolução temporal da conversão indicou que a etapa reacional mais significativa ocorre nos primeiros cinco dias de cura, período no qual se verifica o maior incremento na solubilização do  $P_2O_5$ . Após esse intervalo, observou-se tendência clara de estabilização, com ganhos marginais até o nono dia. Esse comportamento sugere que o tempo tradicionalmente empregado para cura pode ser reavaliado sob critérios técnico-químicos.

Sob o ponto de vista industrial, os resultados possuem relevância direta, uma vez que a possível redução do tempo de cura implica:

- Maior eficiência operacional do pátio de cura;
- Redução de capital imobilizado em produto intermediário;
- Aumento da capacidade produtiva sem necessidade de ampliação estrutural;
- Potencial redução de custos logísticos e de armazenamento.

Além da aplicabilidade prática, o estudo contribui cientificamente ao demonstrar que a presença controlada de carbonato de cálcio altera a cinética de conversão do sistema ácido-rocha fosfática, atuando como agente modulador da acidez residual e da estabilização reacional. Tal evidência amplia a compreensão do comportamento químico do superfosfato simples durante a cura, especialmente em sistemas que utilizam rochas com diferentes composições mineralógicas.

Observou-se ainda que a adição excessiva (7%) pode gerar efeito de diluição da fração reativa, indicando a existência de um intervalo ótimo de incorporação de inerte, situado entre 3% e 5% nas condições estudadas.

Dessa forma, conclui-se que a estratégia proposta apresenta viabilidade técnica e potencial aplicabilidade industrial, configurando-se como alternativa promissora para o melhoramento do processo produtivo do superfosfato simples, com foco na eficiência reacional e na redução do tempo de cura.

O calcário foi escolhido como agente inerte porque apresenta reatividade moderada, permitindo controlar a acidez residual sem comprometer a reação principal da acidulação. Diferente da cal, que é altamente reativa e poderia neutralizar excessivamente o ácido sulfúrico, o calcário atua como modulador suave, além de ser abundante, barato e compatível com o processo industrial. Isso garante eficiência química, estabilidade do produto e viabilidade econômica.

Existem alternativas, como exemplo: Óxido de zinco e óxido de cobre entre outros compostos, mas há necessidade de pesquisa e teste para avaliar quão eficientes serão.

## **7 CONCLUSÕES**

Por meio deste estudo, desenvolvido no programa de pós graduação profissional em engenharia química – UNIUB, foi possível avaliar o processo de acidulação e a etapa de cura do super fosfato simples em testes de bancada,

A etapa de cura é determinante para a consolidação da conversão de  $P_2O_5$  no superfosfato simples.

A incorporação de calcário na rocha fosfática promove a redução significativa da acidez residual que iniciou com 22,93% sendo reduziu para 9,11% (Redução de 39,7%). Quanto à umidade finais, na adição de 5% de calcário reduziu de 11,89% para a 3,14% (redução de 26,4%).

Após a acidulação foram observado melhorias no aspecto físico das amostras tratadas com calcário. Apresenta um fosfato mais poroso e macio, o que facilita o processo de granulação.

As formulações contendo 3% e 5% de calcário apresentaram maior eficiência de conversão de  $P_2O_5$ , atingindo valores superiores a 91%. A maior taxa de conversão ocorre até o 5º dia de cura, havendo estabilização subsequente.

Os resultados indicam viabilidade técnica para redução do tempo de cura de nove para aproximadamente cinco dias, sem prejuízo significativo na qualidade química do produto.

Dessa forma, o estudo demonstra que o ajuste controlado do teor de calcário constitui estratégia promissora para otimização do processo produtivo do superfosfato simples, contribuindo para maior eficiência industrial e potencial redução de custos operacionais.

Como perspectivas futuras, recomenda-se:

- Aplicação de análise estatística inferencial para validação quantitativa das diferenças observadas;
- Modelagem cinética da conversão de  $P_2O_5$ ;
- Avaliação microestrutural das fases formadas durante a cura;
- Testes em escala piloto ou industrial para validação operacional.

O estudo, portanto, consolida evidências de que ajustes controlados na composição da matéria-prima podem representar ferramenta estratégica para otimização do processo industrial de fertilizantes fosfatados, contribuindo para ganhos técnicos e econômicos no setor.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ALVES, José. *Manual de fertilizantes fosfatados*. São Paulo: Editora Agronômica, 2018.
- ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. *Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2023*. São Paulo: ANDA, 2023. Disponível em: <<https://anda.org.br>>. Acesso em: 10 fev. 2026.
- BARRETO, Lázaro Antônio; SILVA, Luciano Freitas; SOUSA JÚNIOR, Mozart Alves de. *Tecnologia de fabricação de fertilizantes*. Uberaba: Fosfertil – Fertilizantes Fosfatados S.A., 2002.
- DAMIANI, Antônio Serafim. *Fertilizantes: atividade agrícola, aspectos gerais da indústria e estudo da demanda*. 1997. 113 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getulio Vargas, São Paulo, 1997. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/4728/1198701021.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- EMBRAPA. *Brazilian agriculture and environment post-Covid19: the sustainability imperative*. Brasília, DF: Embrapa, 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br>>. Acesso em: 13 fev. 2026.
- EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- FOSFERTIL. *Perfil corporativo e operacional*. São Paulo: Fosfertil, 2010. Disponível em: <<http://www.valefertilizantes.com/mda/modulos/conteudo/reinvestidores/risobcamp/docs/fosfertil-atualizado-em-10-02-2010.pdf>>. Acesso em: 29 dez. 2025.
- KNOP, W. *Versuche über Ernährung der Pflanzen*. Leipzig: Verlag, 1860. (ou: KNOP, 1860 apud DAMIANI, 1997, caso não tenha acesso direto à obra original)
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A carreira do fósforo no Brasil. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 155, p. 1–12, 2016.
- MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: UFV, 1999.
- NOVAIS, R. F. et al. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

- PES, Luciano Zucuni; ARENHARDT, Marlon Hilgert. *Fisiologia vegetal*. Santa Maria: Rede e-Tec Brasil, 2015. Disponível em: <[http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos\\_fruticultura/terceira\\_etapa/arte\\_fisiologia\\_vegetal.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos_fruticultura/terceira_etapa/arte_fisiologia_vegetal.pdf)>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- PLANETA ORGÂNICO. *História da agricultura orgânica: algumas considerações*. 2002. Disponível em: <<http://planetaorganico.com.br/site/index.php/historia-da-agricultura-organica-algumas-consideracoes-3/>>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- RAIJ, B. van. *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.
- REPOSITÓRIO UFBA. *Introdução aos fertilizantes*. Salvador: UFBA, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/8048/2/textual-ufba.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- SANTOS, H. G. et al. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SILVA, Douglas Ramos Guelfi; LOPES, Alfredo Scheid. *Princípios básicos para formulação e mistura de fertilizantes*. Lavras: UFLA, 2011. Disponível em: <[http://www.dpv24.iciag.ufu.br/new/dpv24/apostilas/10-boletim\\_fertilizantes.pdf](http://www.dpv24.iciag.ufu.br/new/dpv24/apostilas/10-boletim_fertilizantes.pdf)>. Acesso em: 14 out. 2025.
- VITOR, Adriano Barbosa; CAGLIARI JÚNIOR, Neder. *Produção de fertilizantes*. 2012.
- WORLD BANK. *Commodity markets outlook 2025*. Washington, DC: World Bank, 2025.
- ZANESCO, J. *História da agricultura e fertilizantes*. Curitiba: Editora Universitária, 2016.
- EIRICH USA. *Paddle blenders*. Disponível em: <<https://www.eirichusa.com/en/products/american-process-systems/horizontal-blenders/paddle-blenders>>. Acesso em: 13 fev. 2026.
- XICHENG EP (CN) LTD. Torres de lavagem de gás ácido, lavador de gás de cauda de spray PP. *Made-in-China*. Disponível em: <[https://pt.made-in-china.com/co\\_xichenghuanbao/product\\_Acid-Gas-Scrubbing-Spray-Tail-Gas-Scrubber-PP-Spray-Tower\\_ysurehsyng.html](https://pt.made-in-china.com/co_xichenghuanbao/product_Acid-Gas-Scrubbing-Spray-Tail-Gas-Scrubber-PP-Spray-Tower_ysurehsyng.html)>. Acesso em: 21 abr. 2026