+



**Efeito sinergético de fosfatos e citrato na estabilidade coloidal do leite**

**Thaís L. Oliveira (PG)¹, Camile M. Pimentel (G)¹, Eduarda C.G. Desiderio (G)1, Nathalia da S. Campos (PG)1, Rodrigo Stephani (PQ)1, Luiz Fernando C. De Oliveira (PQ)¹**

¹ Departamento de Química, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG

O leite é uma emulsão complexa com estrutura coloidal composta por proteínas, lipídeos, lactose e sais minerais. A estabilidade térmica do leite (ETL) depende da integridade das micelas de caseína, do pH e do equilíbrio iônico, especialmente do cálcio iônico. Neste trabalho, investigou-se o efeito de sais estabilizantes (citrato, mono-, di- e trifosfato de sódio) sobre propriedades físico-químicas do leite reconstituído, com foco na ETL. Foi aplicado um planejamento de misturas simplex centroide com 19 formulações, e as amostras foram analisadas quanto ao pH, cálcio iônico, distribuição de partículas e tempo de coagulação térmica (HCT). Os resultados contribuem para entender a atuação isolada e sinérgica dos sais, visando otimizar a estabilidade térmica e preservar a qualidade do leite durante o processamento.  
\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*Palavras-chave: leite, sais estabilizantes, estabilidade térmica, caseína.*

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

**Introdução**



O leite é um fluido biológico de composição complexa, contendo proteínas, lipídeos, lactose, sais minerais e vitaminas, dispersos em meio aquoso. A estabilidade coloidal do leite, determinada principalmente pelas micelas de caseína e glóbulos de gordura, pode ser afetada por variações de pH, temperatura e equilíbrio iônico, especialmente pela concentração de cálcio na fase solúvel (1,2). Alterações nessas condições podem levar à perda de estabilidade térmica, resultando em gelificação ou sedimentação, problemas comuns em produtos como o leite UHT (3,4). A adição de sais estabilizantes, como citrato e fosfatos de sódio, é uma estratégia amplamente empregada para aumentar a resistência térmica do leite, uma vez que esses compostos sequestram cálcio iônico e interferem na estrutura micelar, prevenindo a coagulação térmica (5). O comportamento desses sais, isolados ou combinados, influencia diretamente propriedades físico-químicas como pH, distribuição de partículas e tempo de coagulação térmica, sendo, portanto, essencial compreender sua atuação para otimizar formulações industriais (6). Neste contexto, o presente trabalho utiliza um planejamento de misturas para investigar os efeitos da adição de citrato, mono-, di- e trifosfato de sódio sobre a estabilidade térmica do leite reconstituído, buscando combinações mais eficazes para controle da coagulação induzida pelo calor.

**Experimental**

Foi utilizado leite em pó de baixo tratamento térmico (low heat), reconstituído para 9% de sólidos e mantido sob refrigeração por 24 horas. Após esse período, foram adicionados sais estabilizantes (citrato de sódio, monofosfato, difosfato e trifosfato de sódio) em diferentes proporções, o limite máximo foi de 0,1 g/100 mL permitido pela legislação brasileira, expresso como P₂O₅. Seguiu se um planejamento de misturas do tipo simplex-centroide com 19 pontos experimentais. As amostras foram submetidas a tratamento térmico em banho de óleo a 155 °C por 8 minutos e imediatamente resfriadas em banho de gelo. As análises realizadas incluíram pH, cálcio iônico, cálcio total, distribuição do tamanho de partículas e tempo de coagulação térmica (HCT). O delineamento adotado permitiu avaliar o efeito isolado e combinado dos sais na estabilidade térmica e coloidal do leite reconstituído.

**Resultados e Discussão**

1. Potencial Hidrogeniônico (pH)

Forma, Polígono

Descrição gerada automaticamenteO pH do leite controle caiu de 6,70 para 6,60 após o tratamento térmico. A adição de sais quelantes influenciou diretamente o pH, com valores mais baixos observados em misturas contendo mono- e difosfato. As combinações que melhor mantiveram o pH próximo ao controle foram aquelas com maiores proporções de citrato e trifosfato, como nas regiões II, III e IV do gráfico de misturas. O citrato e o trifosfato demonstraram efeito alcalinizante, enquanto mono- e difosfato, levemente ácidos, promoveram a redução do pH.

**Figura 1.** Gráficos de contorno pH = 4 dos leites com adição de sais quelantes (A) e gráficos de contorno para os leites com adição de sais quelantes e tratamento térmico (B).

2. Cálcio Iônico (Ca²⁺)

A concentração média de cálcio iônico caiu de 1,0 mM (controle) para 0,8 mM após o tratamento térmico. Em todos os ensaios com sais, os valores de Ca²⁺ foram inferiores ao controle tratado termicamente. As menores concentrações (0,25–0,40 mM) ocorreram nas regiões com alta proporção de trifosfato (II, III e IV), indicando sua maior eficiência na quelagem de Ca²⁺. Misturas com monofosfato e citrato apresentaram os maiores valores residuais de cálcio livre.

3. Cálcio Iônico em pH 4

No pH 4, próximo ao ponto isoelétrico das caseínas, observou-se uma redução do cálcio iônico em comparação ao controle (17 mM antes e 16 mM após o tratamento). As menores concentrações (10–13 mM) foram encontradas nas regiões com maior presença de trifosfato (III e IV), reforçando sua eficiência como agente quelante mesmo em condições ácidas. Misturas com citrato e monofosfato foram as menos eficazes.

4. Tamanho de Partícula

O tamanho médio das partículas aumentou levemente após o tratamento térmico (de 0,221 µm para 0,239 µm). A adição dos sais quelantes, por si só, não afetou significativamente o tamanho das partículas. Após o aquecimento, observou-se um leve aumento (0,245–0,265 µm), mas sem grandes variações entre as misturas.

5. Tempo de Coagulação Térmica (HCT)

O tempo médio de coagulação reduziu de 28 para 11 minutos após o tratamento térmico no controle. A adição de monofosfato aumentou significativamente o HCT. As melhores combinações (21–24 min), ou seja, maior estabilidade térmica, foram observadas em misturas com mono- e trifosfato (II e IV). Já as misturas com citrato, di- e trifosfato (III) apresentaram os piores resultados (3–9 min).

6. Correlações e Otimização

A análise de correlação de Pearson revelou:

* Correlação negativa entre Ca²⁺ e pH (r = -0,457; p = 0,049),

sugerindo que a redução de pH está associada à maior liberação de cálcio livre.

* Correlação positiva entre Ca²⁺ total e Ca²⁺ a pH 4 (r = 0,588; p = 0,008), indicando persistência do efeito quelante em meio ácido.

A otimização sugeriu como proporção ideal de sais:

43% citrato de sódio, 39% monofosfato de sódio, 17% trifosfato de sódio, com objetivo de manter pH próximo a 6,6 e Ca²⁺ em torno de 0,7 mM. A validação do modelo preditivo permanece como etapa futura.

Desenho de um círculo

O conteúdo gerado por IA pode estar incorreto.

**Conclusões**



A adição de sais quelantes ao leite modifica o pH, a concentração de cálcio iônico e a estabilidade térmica, dependendo do tipo e da proporção usada. Misturas com trifosfato e citrato se destacaram na constância do pH e na redução do cálcio livre. Esses resultados são promissores para aplicações industriais em produtos lácteos com maior estabilidade.

**Agradecimentos**

UFJF, CNPq, CAPES e FAPEMIG.

**Referências**

1. E. Ahmadi; T. Huppertz; T. Vasiljevic, Int. Dairy J. **2024**, 153, 105900.
2. Brasil, Decreto n. 9.013, Diário Oficial da União, 30 mar. 2017, Seção 1, 3–27.
3. O.O. Alegbeleye; et al., Trends Food Sci. Technol. **2018**, 82, 148–166.
4. T. Boumpa; et al., J. Dairy Res. **2008**, 75, 160–166.
5. K. Braun; A. Hanewald; T.A. Vilgis, Foods **2019**, 8, 483.
6. Brasil, Ministério da Agricultura, Portaria n. 370, Diário Oficial da União, 8 set. 1997, Seção 1.