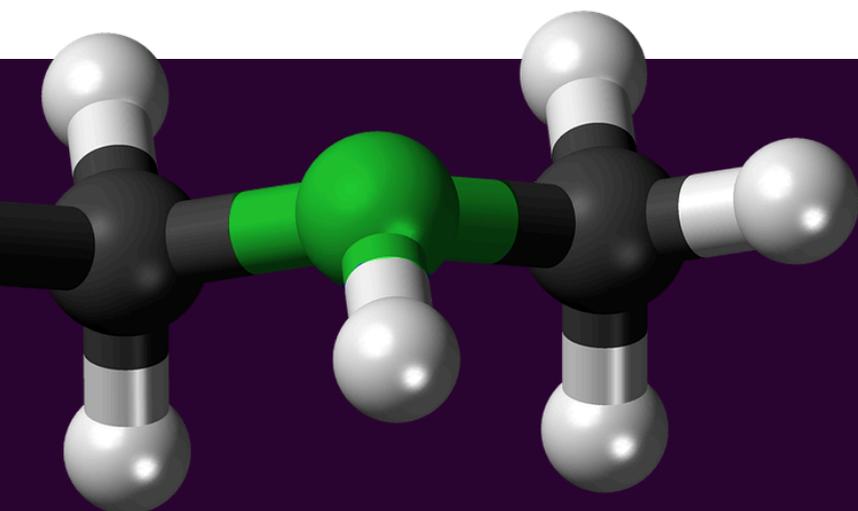


# Protocolos em Química



× ×

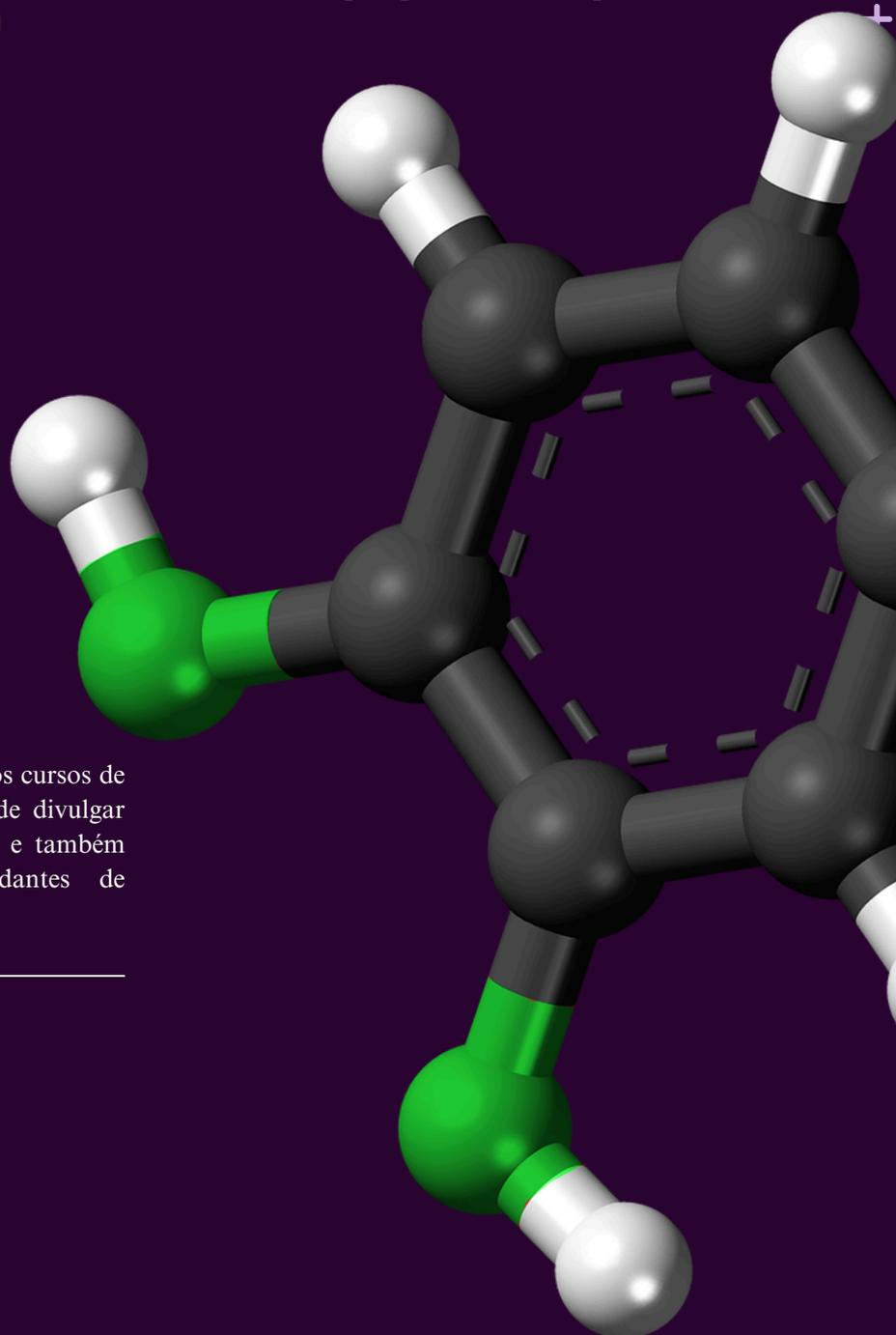
Vol. 2  
Nº. 2

01 de Maio de 2024

<https://protocolosemquimica.com/>

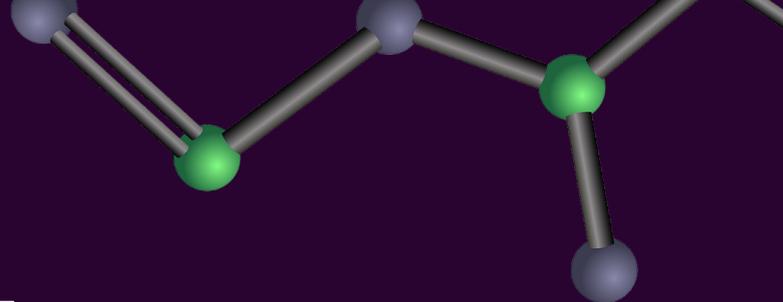
POR PET-QUÍMICA IQ/UNB

Revista científica editorada pelos estudantes dos cursos de química e engenharia química com objetivo de divulgar textos de pesquisa, ensino, artigos de revisão e também artigos escritos exclusivamente por estudantes de graduação.

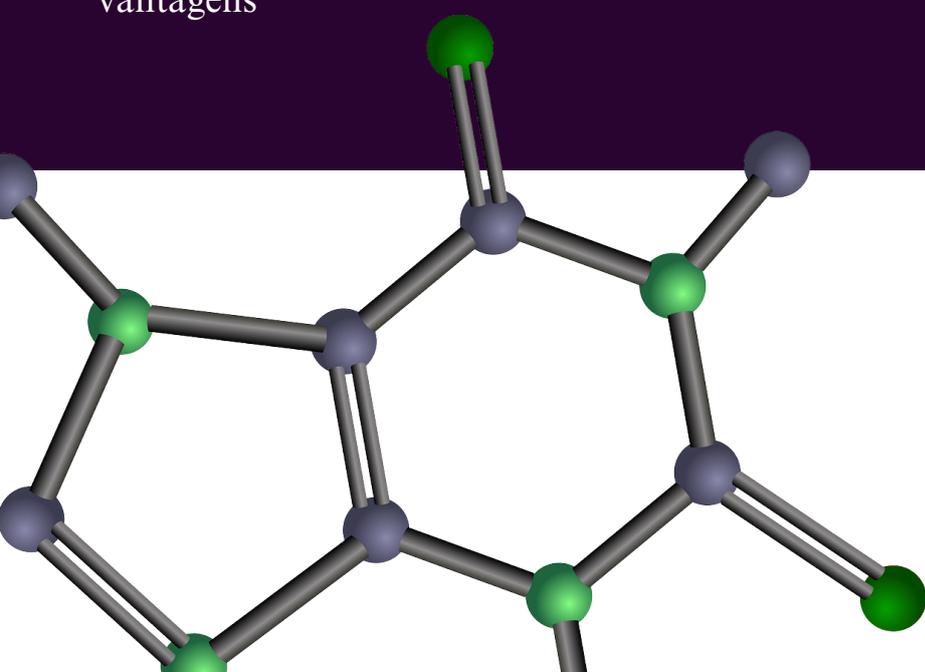


PQ

# SUMÁRIO



Sobre o projeto	3
Editoração	4
<b>Seção Pesquisa:</b>	
Efeito da temperatura, embalagem e tempo de armazenamento em amostras de azeite de oliva	6
<b>Seção QuiArtigo:</b>	
Ação de fungos na biorremediação de diclofenaco	11
A indústria têxtil e os gases do efeito estufa: efeitos da produção de tecidos, fast fashion e slow fashion	16
Etanol combustível: uma revisão acerca dos testes para avaliar sua qualidade	21
Identificação de Substâncias Proibidas: contribuição da Química no controle Antidoping de Enobosarm	29
MTBE como aditivo de alta octanagem na gasolina: riscos de contaminação de águas subterrâneas	34
O uso de adoçantes naturais na indústria de alimentos	38
Produção de refrigerantes no brasil	43
Química Verde do Carbono - Prévia de Um Futuro Energético Sustentável	50
Uma análise composicional do concreto romano e suas implicações na engenharia e na arquitetura moderna	54
<b>Seção Revisão:</b>	
Explorando o Mercado Brasileiro: Produção e Legislação vigente das Bebidas Energéticas	58
Uma revisão sobre o uso de adições minerais no cimento portland e suas vantagens	71

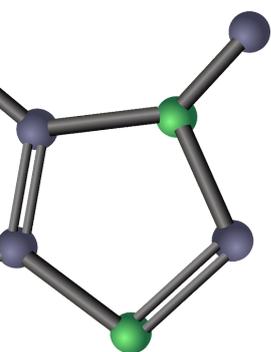


# SOBRE O PROJETO

A Revista Protocolos em Química é um projeto desenvolvido pelo grupo PET-Química/IQ/UnB/MEC visando proporcionar aos seus PETianos, aos discentes do Instituto de Química da Universidade de Brasília e aos demais jovens pesquisadores de áreas correlatas, a inserção de resultados próprios de suas pesquisas em um periódico idiomáticamente acessível e gratuito. Assim, revisões, resenhas, resultados de pesquisas, de trabalhos de Iniciação Científica, de Técnicas de Pesquisa, entre outros trabalhos, podem ser divulgados neste periódico após revisão por pares.

Dessa forma, ela conta com quatro seções, sendo elas: seção pesquisa, seção artigos de revisão, seção ensino e seção QuiArtigo. Dessa forma, na primeira seção poderão ser submetidos trabalhos de pesquisa, inéditos ou não, que visam a divulgação e ampliação do conhecimento químico. A segunda seção é destinada àqueles que desejam apresentar um levantamento de informações a respeito de alguma temática relacionada à Química, analisando-a e discutindo os dados apresentados com uma visão crítica. Na terceira seção, poderão ser submetidos trabalhos de pesquisa na área de ensino de química em todos os níveis de ensino, que considerem a devida relação entre o referencial teórico, o método e a técnica de análise dos dados. Por fim, a quarta seção é exclusiva aos estudantes de graduação e pós-graduação em Química: a seção QuiArtigo. Inicialmente, o QuiArtigo era um trabalho apenas do PET-Química/UnB/MEC, onde cada membro do grupo escrevia uma resenha crítica descrevendo um tema de difícil entendimento por parte do grande público, de uma forma mais acessível sem perder o caráter acadêmico.

Porém, o projeto foi ressignificado para aceitar os trabalhos de outros discentes. Diante disto, sejam todos muito bem-vindos!



# EDITORACÃO

## **Prof. Dr. Davi Aleksandro Cardoso Ferreira**

Tutor do Grupo PET-Química/UnB, professor do Instituto de Química (IQ), pela Divisão de Físico-Química, na Universidade de Brasília (UnB) e idealizador da Revista Protocolos em Química

## **Bárbara Alcântara**

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

## **Eliardo Luz**

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

## **Júlia Vargas**

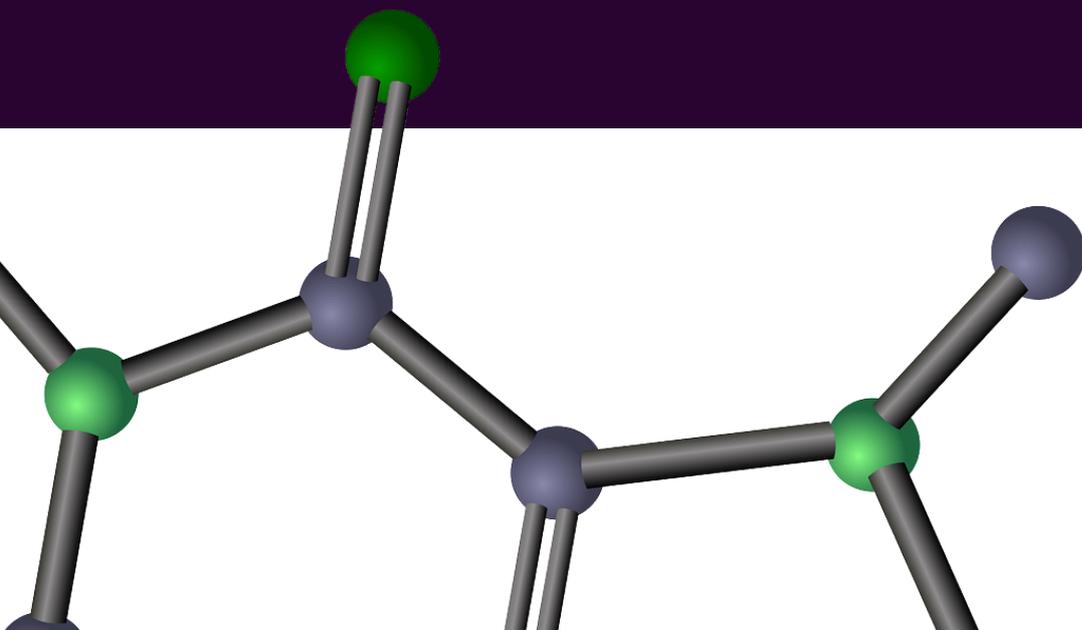
Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

## **Linara Tarusa**

Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

## **Luiza Pedrosa**

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.



**Pedro Paulo Marques**

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

**Paulo Resende**

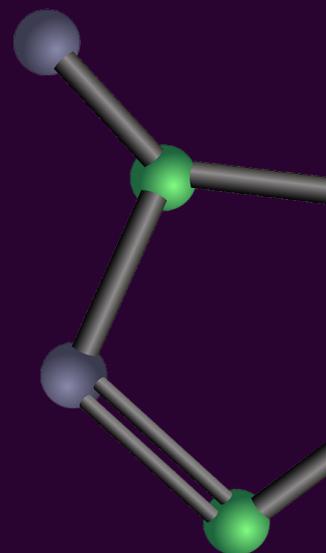
Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

**Victoria Pires**

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

**Vinícius Neibert**

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.



# Efeito da temperatura, embalagem e tempo de armazenamento em amostras de azeite de oliva

DOI: 10.5281/zenodo.11168401

Bruna Cecília S. Oliveira<sup>a\*</sup>, Ana Cristi B. Dias<sup>a&</sup>.

It is known proper storage of food is important for preserving its benefits and properties. In this study, it'll evaluate the effects of temperature and type of package used to store olive oil, over a period of three weeks. Olive oils from two different brands were stored in transparent PET plastic and amber glass packages and exposed to temperatures of 6, 24 and 50 °C, taking as a quality parameter the acidity value that'll be analyzed. The results will be analyzed and the effect of each variable will be discussed.

Sabe-se que o armazenamento adequado de alimentos é importante para a conservação de seus benefícios e propriedades. Neste estudo, os efeitos da temperatura e do tipo de embalagem usado para armazenar azeite de oliva serão avaliados, por um período de três semanas. Azeites de duas marcas diferentes foram estocados em embalagens plástico PET transparente e vidro âmbar e expostos a temperaturas de 6, 24 e 50 °C, tendo como parâmetro de qualidade analisado o índice de acidez. Os resultados serão analisados e será discutido o efeito de cada variável.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: bcoliveira54@gmail.com

&E-mail: acbdias@umb.br

**Palavras-chave:** Azeite de oliva; índice de acidez; parâmetro de qualidade;

Recebido em 28 de fevereiro de 2024,

Aceito em 17 de abril de 2024,

Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

A produção do azeite de oliva é uma das práticas mais antigas que existem, bastante comum entre a população do Mediterrâneo.<sup>1</sup> Acredita-se que se iniciou em Creta, a 2000 a.C., onde uma pequena indústria vendia o azeite para Grécia, norte da África e Ásia Menor. A partir daí os gregos levaram o óleo para Itália, França, Espanha e Tunísia, sendo o período de maior exportação ocorrido durante a expansão do Império Romano.<sup>2</sup>

Naqueles tempos, o azeite tinha diversas utilidades. Além de servir como alimento, era utilizado para fins cosméticos, terapêuticos e medicinais.<sup>2</sup> A oliveira, que produz como fruto a azeitona, possui mais de 30 espécies diferentes e é adaptada para ambientes secos, por isso é composta de folhas persistentes, troncos retorcidos e galhos delgados, podendo atingir por volta de 6 metros de altura.<sup>3</sup> A azeitona é composta de 50 % de água, 22 % de óleo, 19,1 % de carboidratos, 5,8 % de celulose, 1,6 % de proteína e 1,5 % de minerais.<sup>4</sup>

**Figura 1.** Oliveira, *Olea europaea*. Feita por Luigi Nifosi e disponível em Shutterstock.com.

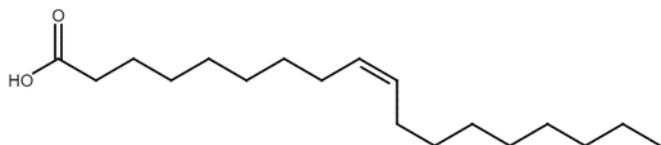


No Brasil, o cultivo da azeitona se deu no século XX, a partir dos emigrantes portugueses, espanhóis e italianos. Em 1990, o estado do Rio Grande do Sul foi o precursor, seguido de Minas Gerais.<sup>5</sup> Com os países do Mediterrâneo sendo destaques na produção de azeite, o Brasil se tornou o terceiro maior importador desse produto. São importadas cerca de 73.000 toneladas por ano, sendo o estado de São Paulo responsável por metade dessa demanda.<sup>1</sup>

O principal componente do azeite de oliva, constituindo cerca de 80% deste óleo, é o ácido oleico, um ácido graxo monoinsaturado. Sua estrutura consiste em uma cadeia longa e linear de 18 carbonos e uma ligação dupla entre o carbono 9 e 10, o que o torna parte da família dos ômega 9.

Além do ácido oleico, o azeite é rico em oligoelementos e vitamina E, que são conhecidos por serem antioxidantes naturais, assim, atribui-se ao óleo qualidades benéficas à saúde.<sup>4</sup>

**Figura 2.** Estrutura química do ácido oleico.

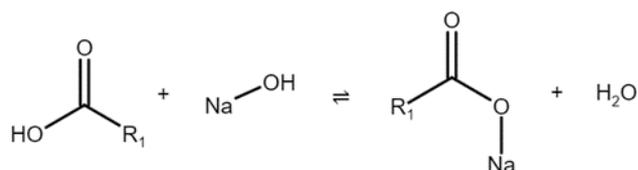


Quando exposto à presença de água, oxigênio, luz e calor, o azeite sofre algumas reações como hidrólise e oxidação, que impactam diretamente na qualidade do produto, como sabor, cor, cheiro e qualidade nutricional. O índice de acidez é um parâmetro que avalia principalmente as condições de conservação do produto, ou seja, processamento, grau de pureza do óleo, provisionamento e condições de conservação da matéria prima. Esse índice é um fator qualitativo, pois, a partir dele, é possível saber se o custo de industrialização foi baixo ou alto.<sup>6</sup> Para que ocorra a comercialização no Brasil, é necessário que o azeite esteja de acordo com os padrões de qualidade da ANVISA.

Um alto índice de acidez atribui odor e sabor desagradável ao óleo, assim como características químicas nocivas à saúde, devido à toxicidade dos produtos formados.<sup>7</sup> A acidez está diretamente ligada ao teor de ácidos graxos livres, resultado da hidrólise enzimática. Assim, é possível saber se o azeite estava em um ambiente de alta umidade ou entrou em contato com água durante o processamento industrial<sup>8</sup>. A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) considera o valor de índice de acidez aceitável de  $\leq 0,8\%$  no azeite de oliva comercializado no Brasil.<sup>9</sup>

A determinação deste parâmetro é feita a partir de uma titulação ácido-base. Na reação de neutralização, o hidróxido de sódio reage com o ácido graxo e este é eliminado na forma de sabão.<sup>10</sup>

**Figura 3.** Reação de neutralização do ácido graxo.



Visto a importância de um bom controle de qualidade de alimentos, esta pesquisa tem como objetivo estudar a degradação do azeite em determinadas condições de temperatura e embalagem de armazenamento. Este estudo irá realizar uma análise periódica do índice de acidez de duas marcas de azeites de oliva extravirgem durante um período de estocagem de 3 semanas.

## Metodologia

Inicialmente, foram escolhidas duas diferentes marcas de azeite de oliva extravirgem, que neste texto serão chamadas de Marca 1 e Marca 2. A primeira tem índice de acidez expresso no rótulo de 0,5 % e sua embalagem original é vidro âmbar, já a segunda possui índice de acidez de 0,4 % e sua embalagem original é plástico PET âmbar. Os azeites foram armazenados em duas embalagens diferentes, sendo esses plásticos PET transparente e vidro âmbar, e uma parte foi estocada na geladeira (6 °C), outra no armário (24 °C  $\pm$  2 °C) e a outra na estufa (50 °C), durante um período de 3 semanas. Todas as amostras foram armazenadas no escuro, ou seja, estavam protegidas da luz solar e artificial.

**Figura 4.** Amostras de azeite armazenadas nas embalagens de plástico PET transparente e vidro âmbar, expostas em três tipos de ambientes com diferentes temperaturas, (a) estufa a 50 °C, (b) geladeira a 6 °C e (c) armário a 24 °C.



O método utilizado nesta pesquisa foi o Ca 5a-40 da AOCS<sup>11</sup>, no qual consiste em uma titulação volumétrica ácido-base. Como titulante, é usado uma solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) de concentração 0,01 mol/L, sendo necessária

padronização. Para preparar essa solução, foi pesado 0,1 g de NaOH 98% sólido em um béquer de 100 mL, dissolveu-se completamente o sólido em água destilada, transferiu-se para um balão volumétrico de 250 mL e o volume foi aferido até o menisco com água destilada. Para a padronização da solução, foi pesado 0,02 g de Biftalato de Potássio ( $C_8H_5KO_4$ ) 98 % sólido em um erlenmeyer de 125 mL, foi adicionado 50 mL de água destilada e 3 gotas de uma solução alcoólica, preparada no laboratório, do indicador Fenolftaleína, 1 % em Álcool 95 %. Essa solução do erlenmeyer foi titulada, em triplicata, com a solução preparada de NaOH até o aparecimento de uma coloração levemente rosa, indicando o ponto final da titulação. Para calcular a concentração da solução de NaOH preparada, em mol/L, utiliza-se a equação 1.

$$[NaOH] = \frac{m \cdot P}{MM \cdot V} \cdot 1000 \quad \text{Equação 1}$$

sendo “m” a massa de  $C_8H_5KO_4$  pesada, em gramas, “P” a pureza do  $C_8H_5KO_4$ , em porcentagem, “MM” a massa molar do  $C_8H_5KO_4$ , em mol por litro e “V” o volume gasto na titulação, em mililitros.

Para a titulação que determina o índice de acidez, foram pesados 5 g da amostra de azeite em um Erlenmeyer de 125 mL, adicionados 10 mL de uma solução Éter Etilíco 99 % e Etanol 96 % na proporção de 2:1 e 3 gotas do indicador Fenolftaleína, usado anteriormente na padronização da solução de NaOH. O ponto final da titulação é indicado pelo aparecimento de uma coloração rosada/alaranjada e todo o procedimento foi realizado em triplicata real. O índice de acidez pode ser calculado a partir da equação 2.

$$I. A (\%) = \frac{V \cdot [NaOH] \cdot 56,1}{m} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo “V” o volume gasto na titulação, em mililitros, “[NaOH]” a concentração da solução de hidróxido de sódio preparada no laboratório, em mol por litro e “m” a massa da amostra de azeite pesada, em gramas.

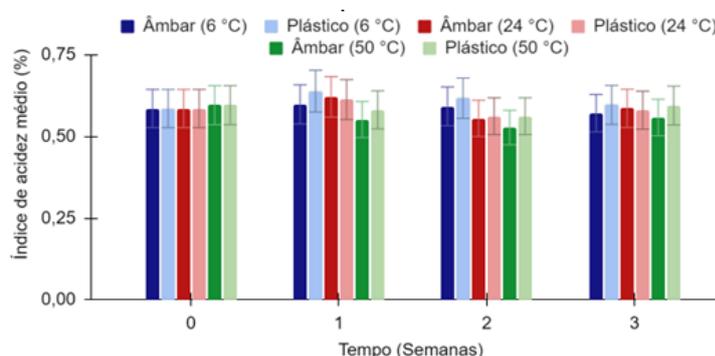
As análises foram realizadas semanalmente, durante um período total de 3 semanas, mais a análise do zero, que é o valor do índice de acidez do azeite antes das amostras serem armazenadas nas condições de estudos citadas anteriormente. A cada semana era preparada uma nova solução de NaOH 0,1 mol/L e feita a devida padronização.

## Resultados e discussão

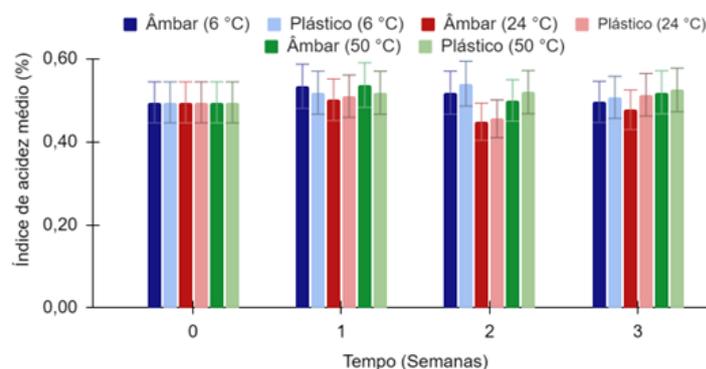
Após as titulações serem concluídas, para análise dos resultados, construiu-se um gráfico de índice de acidez vs tempo. Como é possível observar nos gráficos 1 e 2, o índice de acidez de ambas as marcas de azeite se mantiveram estáveis e dentro dos valores de parâmetros estabelecidos pela ANVISA de  $\leq 0,8$  %, durante o período de estudo.

O azeite da Marca 1 apresenta no rótulo um índice de acidez de 0,5 %, e foi observado que os valores obtidos foram um pouco acima disso, todavia, o aumento não foi muito significativo e se manteve constante durante o período de análise. O azeite da Marca 2 tem índice de acidez expresso no rótulo de 0,4 % e os valores obtidos foram razoavelmente maiores que o azeite da Marca 1, apesar disso, manteve-se abaixo do valor máximo de 0,8 % e permaneceu constante durante o estudo. Importante destacar que o intervalo dos erros foi bastante próximo entre si, logo, é possível afirmar que os valores são estatisticamente iguais, ou seja, não sofreram alterações significativas.

**Gráfico 1.** Índice de acidez obtido em 3 semanas de análises do azeite da Marca 1.



**Gráfico 2.** Índice de acidez obtido de 3 semanas de análises do azeite da Marca 2.



As amostras que foram conservadas na geladeira, numa temperatura de 6 °C, tiveram um aumento considerável da viscosidade, semelhante a textura de mel, e cristalizaram. O aumento da viscosidade não acarreta nenhum prejuízo no uso comum do azeite, contudo, a cristalização do azeite impossibilita seu uso imediato, comprometendo a praticidade de utilizá-lo no dia a dia. As amostras da Marca 2 cristalizaram mais, comparadas às da Marca 1, independente da embalagem. Este fato, por sua vez, não foi um empecilho para as análises dentro do laboratório, visto que as amostras descristalizavam num intervalo de 10-15 minutos em temperatura ambiente.

As amostras que foram armazenadas na estufa, a 50 °C, apresentaram uma redução da viscosidade, semelhante à textura mais líquida, e, a partir da segunda semana, mau cheiro. As amostras com mau odor mais significantes foram as das embalagens de plástico PET transparente. Assim como as amostras da geladeira que sofreram um aumento da viscosidade, neste caso, a redução também não gera nenhum prejuízo em relação ao consumo do azeite.

As amostras armazenadas no armário, a 24 °C, foram as únicas que não apresentaram observações físicas pertinentes. As amostras não sofreram nenhuma alteração de cheiro e nem de viscosidade perceptivas. Esse comportamento era esperado, pois essa é a recomendação presente no rótulo das embalagens originais para armazenar azeite de oliva.

Existem vários parâmetros de qualidade para o controle do azeite. É equivocado declarar que as amostras estudadas estão aptas para o consumo, levando em consideração apenas um desses parâmetros. Ainda que os valores obtidos de índice de acidez estejam em conformidade com as normas da ANVISA, o mau cheiro é uma característica sensorial que não pode ser ignorada.

Como citado anteriormente, o mau cheiro está associado a um alto índice de acidez<sup>5</sup>, porém não foi o que ocorreu com o experimento, já que este apresentou um valor aceitável durante o período de análises. É sabido que o plástico PET sofre decomposição quando exposto a altas temperaturas, onde substâncias químicas se desprendem do plástico e são transferidas para o produto<sup>12</sup>, então o surgimento do mau cheiro pode estar relacionado a algum composto presente na embalagem que sofreu determinada reação química, e não necessariamente está associado a uma degradação natural do azeite. É importante frisar que são apenas hipóteses, pois não foi feito nenhum estudo direcionado a decomposição da embalagem de plástico PET.

## Conclusões

Todas as amostras apresentaram índice de acidez abaixo de 0,8 %, indicando estar dentro dos parâmetros de qualidade estipulados pela ANVISA. Durante o período de estoque das amostras de azeite, foi perceptível um aumento na viscosidade e cristalização do azeite nas amostras armazenadas na geladeira. Já as amostras guardadas na estufa apresentaram uma redução na viscosidade e mau cheiro característico de azeite estragado. As amostras estocadas no armário foram as únicas que não apresentaram alteração no cheiro e viscosidade.

Mesmo que o índice de acidez afirme que as amostras estão dentro dos parâmetros de qualidade, a presença do mau cheiro nas amostras armazenadas na estufa é uma característica na qual não deve ser ignorada. Esta particularidade pode estar relacionada a embalagem de plástico PET transparente usada para o armazenamento, visto que o plástico PET sofre decomposição em altas temperaturas.

Devido ao mau cheiro, não se recomenda o consumo destas amostras que foram estocadas na estufa.

Para próximos estudos, é sugerido avaliar outros parâmetros de qualidade como a capacidade antioxidante, índice de peróxido, extinção específica, índice de  $p$ -anisidina, assim como aumentar o tempo de armazenamento para próximo da validade do azeite analisado.

## Contribuições por Autor

A escrita, a realização experimental deste trabalho e a inclusão de algumas observações são de Bruna Cecília de Sousa Oliveira.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Agradeço à direção, docentes, discentes e funcionários do Instituto de Química da Universidade de Brasília. À minha orientadora, pela oportunidade de iniciar na pesquisa. Ao grupo do LIAMA, pela ajuda e companheirismo dentro do laboratório. E ao PET-Química/IQ/UnB pela oportunidade de publicar meu trabalho da disciplina de Técnica de Pesquisa.

## Notas e referências

- 1 S. Aued-Pimentel, Olive oil in Brazil: Economic and Regulatory control aspects. In: Products from Olive Tree, Rijeka, IntechOpen, **1 edition**, **2016**, p.303-305, 2016.
- 2 P. L. Couteur and J. Burreson, *Os Botões de Napoleão: As 17 Moléculas que Mudaram a História*, Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editora, **1 edition**, 2006, pp. 255-264.
- 3 C. A. Nogueira-de-Almeida, D. R. Filho, E. D. de Melo, G. Melz and A. C. F. Almeida, Azeite de Oliva e suas propriedades em preparações quentes: revisão da literatura, *International Journal Of Nutrolog*, 2015, **8(2)**, 13-20.
- 4 N. Jorge, *Química e Tecnologia de Óleos Vegetais*, São Paulo, cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, **1 edition**, 2009, pp. 26, 94-95.
- 5 P. Freitas, Azeite Online “História”, <https://azeiteonline.com.br/azeite-2/pagina-exemplo/#:~:text=No%20Brasil%2C%20o%20planti%20de,cidade%20de%20Maria%20da%20F%C3%A9,A9>, (Accessed January 16, 2024).
- 6 R. P. Gonçalves, P. H. Março **and** P. Valderrama, Degradação térmica de tocoferol e produtos de oxidação em diferentes classes de azeite de oliva utilizando espectroscopia UV-Vis e MCR-ALS. *Química Nova*, 2015, **38(6)**, 864–867.
- 7 G. M. Santos, M. M. Brito, P. V. L. Sousa **and** N. V. A. Barros, Determinação do índice de acidez em óleos de soja comercializados em supermercados varejistas; *Revista Ciência e Saúde On-line*, 2017, **2(2)**, 11-14.
- 8 P. C. Santos, F. Tosato, M. Cesconetto, T. Corrêa, F. D. Santos, V. Lacerda Jr., A. A. Pires, A. V. F. N. Ribeiro, P. R. Filgueiras **and** W. Romão, Determinação da autenticidade de amostras de azeite comerciais apreendidas no estado do espírito santo usando um espectrofotômetro portátil na região do NIR. *Química Nova*, 2020, **43**, 891-900.
- 9 ANVISA. **Resolução da Diretoria Colegiada- RDC N° 327**, de 9 de dezembro de 2019.
- 10 B. D. Hochscheidt, E. S. Possamai, M. P. M. Silva, J. Dieter, F. R. Silva **and** R. Sequine, Neutralização ou Esterificação como Técnicas de Melhoria dos Insumos para Produção de Biodiesel; *Rev. Virtual Quim.*, 2020, **12**, 325-334
- 11 L. M. Zzopardi, Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists’ Society, Illinois, AOCS American Oil Chemistry Society, **7 edition**, 2017.
- 12 S. Gibbens, Garrafas plásticas podem se tornar perigosas quando expostas ao calor extremo, <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2019/07/garrafas-plasticas-podem-se-tornar-perigosas-quando-expostas-ao-calor-extremo>, (accessed March 28, 2024)

# Ação de fungos na biorremediação de diclofenaco

DOI: 10.5281/zenodo.11089834

Luiza P. F. de Souza<sup>a\*</sup>

This article is a review of the study by M. F. Blanco-Orta and co-workers,<sup>4</sup> aiming to compare the results of the experiments conducted with other literature, as well as addressing the issue of diclofenac found in our waters and the possibility of bioremediation using easily obtainable fungi.

Este artigo é uma revisão do estudo de M. F. Blanco-Orta e colaboradores,<sup>4</sup> buscando comparar o resultado dos experimentos realizados com outras literaturas, além de abordar a problemática do diclofenaco encontrado em nossas águas e a possibilidade da biorremediação utilizando fungos de fácil obtenção.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: luizapedrosafsouza@gmail.com

**Palavras-chave:** biorremediação; diclofenaco; fungos.

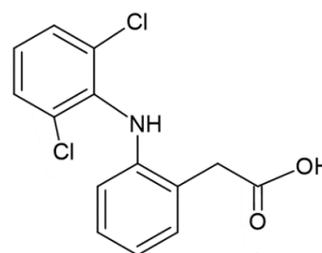
Aceito em 22 de março de 2024,  
Aprovado em 26 de abril de 2024,  
Publicado 01 de maio de 2024.

## Introdução

A biorremediação é um processo que visa degradar, remover ou reduzir produtos tóxicos, transformando-os em substâncias não prejudiciais. No Brasil, a poluição de rios, lagos e represas é frequentemente causada por metais pesados, que são substâncias difíceis de serem removidas. Dessa forma, surgem cada vez mais estudos que buscam caracterizar fungos que possam degradar ou remover esses poluentes. Entretanto, os metais pesados não são os únicos poluentes que podem ser retirados da água utilizando biorremediação, surgem cada vez mais estudos que buscam utilizar microrganismos para esse fim, uma vez que esse é um processo que apresenta menor agressão ao ecossistema.<sup>1</sup>

Além dos metais pesados, outros poluentes geram preocupações. O amplo consumo de produtos farmacêuticos seguidos de seu descarte inadequado tem causado aumento nas concentrações dessas substâncias em ambientes aquáticos.<sup>2</sup> A principal fonte de produtos farmacêuticos no ambiente é a excreção de formas não metabolizadas ou metabólitos ativos por humanos e animais de criação através de urina e fezes, seguida pelo descarte de resíduos da indústria farmacêutica e hospitais, bem como pela liberação doméstica de medicamentos residuais. Essas substâncias podem permanecer por muito tempo no ambiente e, dentre elas, uma que está chamando atenção dos pesquisadores por sua concentração nas águas é o diclofenaco (DCF), (2-[2-[(2,6-diclorofenil) amino]fenil]).<sup>3,4</sup>

Figura 1. Estrutura molecular do diclofenaco.



O DCF faz parte do grupo dos Hormônios e anti-inflamatórios não esteroides (AINEs), ele representa um risco potencial comprovado para organismos, ambientes e humanos e tem sido frequentemente detectado em águas residuais, lodo de esgoto e solos.<sup>5</sup> Devido aos potenciais efeitos nocivos, o diclofenaco foi priorizado nas políticas de monitoramento da água na União Europeia.<sup>6</sup>

Espécies marinhas que foram expostas ao DCF apresentaram efeitos negativos em seus organismos como estresse oxidativo, ativação de respostas imunes, decréscimo na energia disponível para crescer, entre outros.<sup>7</sup> O tratamento convencional de efluentes geralmente não é eficaz na remoção do DCF, levando ao interesse crescente na biorremediação. Estudos têm sido feitos explorando a utilização de fungos, bactérias ou microalgas para degradar contaminantes, uma vez que esse processo é considerado seguro, econômico e ecologicamente correto.<sup>4,8,9</sup> Os fungos, em particular, têm mostrado eficácia na remoção do diclofenaco, com taxas de remoção acima de 96%, pelas espécies *Trametes versicolor*,

*Ganoderma lucidum*, *Irpex lacteus* e *Penicillium oxalicum*, usando mecanismos como biodegradação, oxidação e biotransformação.<sup>2</sup>

No entanto, muitas outras espécies de fungos também têm sido exploradas para fazer a biorremediação do DCF. O artigo em referência que será analisado traz o estudo da eficácia de três fungos produzidos industrialmente e usados na biorremediação desse fármaco. Iremos então comparar a eficácia com a de outros fungos estudados por outros autores com esse mesmo objetivo.

## Metodologia

M. F. Blanco-Orta e colaboradores fizeram este estudo analisando as espécies *Pleurotus ostreatus* 32783, que foi doada, *Aspergillus niger* 9142 e *Penicillium roqueforti*, que foram isoladas do queijo azul.<sup>4</sup>

Os experimentos de remoção de diclofenaco foram realizados em meio mínimo de sais de Vogel (MMV), em 1 litro de água destilada com 5 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 3 g de citrato de sódio penta-hidratado, 2 g de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 0,2 g de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0,1 g de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0,005 g de ácido cítrico, 0,005 g de  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0,001 g de  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 0,00025 g de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 0,00005 g de  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 0,00005 g de  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 0,00005 g de  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 0,005 mg de biotina e 20 g de glicose.<sup>4</sup>

O extrato fúngico resultou de um período de crescimento fúngico de 96 horas em meio MMV. Os fungos *A. niger* e *P. roqueforti* cresceram em pratos de Agar Batata Dextrose (ABD), que é composto de infusão de batata desidratada e dextrose que estimulam o crescimento de fungos, depois foram incubados, sendo agitados a 200 rpm por dois dias e o *P. ostreatus* cresceu em um prato de ABD com extrato de trigo e foi incubado, sendo agitado a 200 rpm por 15 dias.<sup>4</sup>

Um conjunto de diferentes MMV foi preparado variando o pH do meio basal para 2.0, 3.0 e 4.0. Em outro conjunto de meios, ajustados para os mesmos valores de pH, foi adicionado com NaCl (100 mM). Tanto os fungos quanto o diclofenaco foram analisados individualmente nas condições do MMV em diferentes pH para identificar possíveis efeitos adversos.<sup>4</sup>

Depois de 5 dias de incubação em temperatura ambiente com agitação de 200 rpm, o estudo investigou a biossorção do diclofenaco na parede celular fúngica por meio

de interações eletrostáticas. A biomassa de cada fungo foi recuperada ao final do período de incubação, lavadas e agitadas com solução de NaCl (2 M) para recuperar todo o diclofenaco adsorvido eletrostaticamente dos componentes da parede celular. Em seguida, os autores determinaram as atividades enzimáticas degradantes de diclofenaco extracelular. Eles calcularam a concentração usando dados de absorvância e interpolaram na curva padrão de albumina sérica bovina (0 a 0,8 mg/ml), depois usaram as concentrações para analisar a degradação do diclofenaco como descrito no artigo.<sup>4</sup>

Posteriormente, foi determinada a concentração de diclofenaco por cromatografia líquida de alta eficiência em fase reversa. Por fim, foi feita a análise estatística e os experimentos foram feitos em triplicatas para as melhores condições determinadas de pH de cada espécie. Os dados obtidos foram analisados pelo teste de análise de variância (ANOVA) de uma via com correção de Tukey para determinar a significância estatística desses resultados, ao verificar se há diferenças significativas entre três ou mais médias entre grupos independentes e onde está a diferença.<sup>4</sup>

## Resultados e discussão

Os fungos *P. roqueforti* e *P. ostreatus* foram escolhidos por serem de fácil obtenção como subprodutos da indústria alimentícia ou produtos fora da validade. Por serem espécies comestíveis, são não patogênicas e são adequadas para uma estratégia segura de biorremediação. Esses fungos, juntamente com o *A. niger*, que é amplamente utilizado em muitos objetivos biotecnológicos, são uma fonte sustentável de biomassa residual ativa. O *P. ostreatus* além de ser de fácil obtenção também não tem formação de esporos quando cresce em culturas submersas, não forma esporos, limitando sua dispersão, o seu lado negativo é seu lento crescimento.<sup>4</sup>

No artigo em referência,<sup>4</sup> o *P. roqueforti* mostrou a menor capacidade de remover diclofenaco do meio de cultura, além de ter sido um processo lento em todas as condições estudadas, o melhor desempenho de *P. roqueforti* foi observado em cultura com pH 4.0, com uma remoção de 32,5%. A capacidade de remoção diminui sob condições mais ácidas tanto para *P. roqueforti* quanto para *P. ostreatus*, enquanto o contrário foi observado para *A. niger* que removeu mais diclofenaco no pH mais ácido. Ademais, a adição de NaCl ao meio de cultura afeta o desempenho fúngico em todos os três valores de pH testados para *P. roqueforti*, possivelmente afetando a fisiologia fúngica devido a um efeito negativo nas funções proteicas.

A espécie *A. niger* removeu 61,99% do diclofenaco em solução em pH 2.0, o que representa quase 2 vezes do que foi retirado pela *P. roqueforti*, este resultado foi inesperado, já que o pH 2.0 é uma condição de ácido forte e pouca biomassa se desenvolve sob ela. Em contraste, a pH 4.0, *A. niger* removeu apenas 30,9% de diclofenaco. Para esse fungo, a adição de NaCl aumentou a capacidade de remover DCF para os pH 3.0 e 4.0, sendo que no pH 3.0 com adição de NaCl foi observado a remoção de 74,54%.<sup>4</sup> Um valor relativamente alto, mas ainda longe dos valores encontrados em outras literaturas para diferentes fungos.<sup>2</sup>

No estudo feito, das três espécies fúngicas estudadas a espécie *P. ostreatus*, mostrou a melhor capacidade de remoção. No pH 4.0, a *P. ostreatus* alcançou remoção de diclofenaco de 95,6% na ausência de NaCl e 100% na presença de NaCl. No pH 2.0 e 3.0 foi observado uma grande capacidade de remoção também, 69,97% e 95,61%, respectivamente, porcentagens que diminuíram com a adição de NaCl, porém ainda apresentaram um bom resultado, 67,67% para o pH 2.0 e 73,89% para o pH 3.0. Os resultados da pesquisa feita podem ser observados na Tabela 1.<sup>4</sup>

**Tabela 1.** Porcentagem de DCF removido pelas três espécies testadas em diferentes meios.

Meio	<i>P. roqueforti</i>	<i>A. niger</i>	<i>P. ostreatus</i>
pH 2.0	24,48%	61,99%	69,97%
pH 3.0	28,50%	38,75%	95,61%
pH 4.0	32,54%	30,87%	97,84%
pH 2.0, com NaCl	13,59%	57,11%	67,67%
pH 3.0, com NaCl	23,86%	74,54%	73,89%
pH 4.0, com NaCl	16,55%	46,95%	100%

A análise cromatográfica revelou uma pequena fração de diclofenaco absorvida nos micélios dos fungos *P. roqueforti* e *A. niger* (<0,5%). Também, revelou que o valor de pH é um determinante para a biossorção de DCF, independentemente da presença de NaCl para o *P. roqueforti*, e dependente da quantidade de NaCl no meio de cultura para o *A. niger*.<sup>4</sup>

Já a espécie *P. ostreatus* mostrou uma maior quantidade de diclofenaco ligado à parede celular em um pH de 2.0, 9,4% do diclofenaco total foi recuperado da biomassa desenvolvida na presença de NaCl, o que sugere a existência de diferenças relevantes na composição da parede celular da *P.*

*ostreatus* quando comparada a *P. roqueforti* e a *A. niger*, uma vez que a biomassa tratada com sal de *P. ostreatus* liberou mais de 40 vezes a quantidade de DCF em comparação com as outras espécies na mesma quantidade de sal e no mesmo pH.<sup>4</sup>

Para entender o que faz com que a *P. ostreatus* tenha essa maior capacidade de remover o DCF o estudo abordou a importância das proteínas extracelulares dessa espécie e determinou que elas são essenciais na remoção do diclofenaco do meio de cultura.<sup>4</sup>

Comparando com outros artigos da literatura podemos observar que apesar de sua fácil obtenção, nem o *A. niger*, nem o *P. roqueforti* obtiveram resultados tão positivos em comparação com outros fungos.<sup>2,10,11</sup> Estudos mostram outras opções de fungos para a degradação de DCF, como o *Phanerochaete chrysosporium* que consegue degradar até 97% de DCF em 6 dias na concentração de 1 mg de DCF por litro e 93% na concentração de 10 mg de DCF por litro.<sup>9</sup> Os fungos da podridão branca, *Bjerkandera adusta*, *Phanerochaete chrysosporium* e um anamorfo de *Bjerkandera* sp. R1 também foram estudados para a degradação do DCF. Até 99% foi degradado pelo anamorfo de *Bjerkandera* sp. R1 em 4 dias, mas o DCF ainda estava presente nos frascos com *B. adusta* e *P. chrysosporium* depois de 7 dias, embora em níveis muito baixos (9 e 12%, respectivamente).<sup>12</sup> Outro estudo mostra que a biorremediação de compostos farmacêuticos contidos em águas residuais, também é possível por meio da ação oxidativa de enzimas (lacases) fúngicas.<sup>13</sup> Uma revisão também mostra que um dos fungos com valores mais altos de degradação na literatura são encontrados para o *Trametes versicolor* com alguns estudos que chegaram a encontrar 100% de degradação de DCF.<sup>2</sup>

Apesar dos resultados baixos encontrados por M. F. Blanco-Orta e colaboradores<sup>4</sup>, o *A. niger* em consórcio com outros fungos indígenas da África do sul, *M. circinelloides*, *T. polyzona*, *T. longibrachiatum* e *R. microsporus*, apresentou excelentes resultados de remoção de 99,84% de DCF na concentração de 1mg/L usando a biodegradação e oxidação.<sup>14</sup> O que mostra que, apesar do baixo valor de degradação encontrado pelo artigo de referência, esse fungo ainda é promissor em diferentes condições e deve ser levados em consideração para a biorremediação de DCF principalmente por ter relativamente uma fácil obtenção. O *P. ostreatus* também mostrou resultados positivos na remoção de 97% de DCF na concentração de 20 µg/L em outro estudo usando a biodegradação, o que corrobora com os achados do artigo de referência.<sup>15</sup> Já o *P. roqueforti* não foi encontrado em outras literaturas sobre o assunto, o que abre espaço para que mais

estudos sejam feitos sobre seu uso na biorremediação, já que esse fungo de fácil obtenção poderia possivelmente ter resultados melhores em outras condições. No entanto, a literatura traz fungos que tem capacidades muito mais altas de degradação que já estão sendo estudados.

## Conclusões

A presença de diclofenaco nas águas de rios e mares, tem se mostrado um problema para o meio ambiente, de forma que levantou preocupações fazendo com que pesquisadores buscassem maneiras de remover esse fármaco. A biorremediação se mostra uma forma promissora de alcançar este objetivo, uma das formas sendo a utilização de fungos.

Muitos fungos têm sido estudados para este efeito, dentre eles M. F. Blanco-Orta e colaboradores testaram o uso de *Pleurotus ostreatus* 32783, *Aspergillus niger* 9142 e *Penicillium roquefortii*, que são espécies de fácil obtenção.<sup>4</sup>

O *P. roquefortii* apresentou o pior resultado removendo somente 32,5% de diclofenaco na sua melhor atuação. O *A. niger* demonstrou resultados melhores, 74,54% de remoção na sua melhor atuação, que se mostrou um bom resultado, mas abaixo da capacidade de outros fungos. Por fim, o melhor resultado foi do *P. ostreatus* que alcançou uma remoção de 100% de diclofenaco no pH 4.0 na presença de NaCl. A análise cromatográfica também revelou a capacidade de biossorção do *P. ostreatus* muito superior à dos outros dois fungos, principalmente por causa das proteínas extracelulares dessa espécie.

Muitas pesquisas foram feitas com diferentes fungos e apresentaram resultados promissores com valores mais altos de degradação de diclofenaco. Outros estudos mostram a possibilidade de se obter resultados melhores para *A. niger* em diferentes condições<sup>14</sup> e mais estudos podem ser conduzidos para determinar a capacidade de remoção do diclofenaco com o *P. roquefortii*. Dessa forma, podemos entender que esse assunto tem tido grande atenção de pesquisadores que estão trazendo diversas soluções de maneira ecológica utilizando fungos na biorremediação para a retirada de fármacos da água, dentre eles o diclofenaco. Ademais, os fungos também podem ser utilizados para degradar outros fármacos<sup>12</sup>, além de metais pesados<sup>1</sup>, e outros poluentes. Estudos para a degradação do diclofenaco já estão sendo conduzidos e espera-se que este problema possa ser solucionado com a biorremediação usando fungos.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Luiza P. F. de Souza.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SESu/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 L. de C. Fontes, Biorremediação, <https://microbiologia.icb.usp.br/cultura-e-extensao/textos-de-divulgacao/bacteriologia/microbiologia-ambiental/biorremediacao/>, (acessado 22 de março, 2024)
- 2 J. Rocha, J. Santos, C. Demarco, L. A. Bender, S. Pieniz, M. S. Quadro and R. Andrezza, Biorremediação: usos e aplicações para degradação de diclofenaco, *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 2022, **13**, 131–151.
- 3 M. Klavarioti, D. Mantzavinos and D. Kassinos, Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes, *Environment International*, 2009, **35**, 402–417.
- 4 M. F. Blanco-Orta, R. F. García-de La Cruz, L. M. T. Paz-Maldonado, D. A. Pedraza-González, M. M. Morales-Avila, V. E. Balderas-Hernández, O. González-Ortega and A. S. Pérez-Martínez, Assessing three industrially produced fungi for the bioremediation of diclofenac, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2023, **58**, 661–670.
- 5 H. Ericson, G. Thorsén and L. Kumblad, Physiological effects of diclofenac, ibuprofen and propranolol on Baltic Sea blue mussels, *Aquatic Toxicology*, 2010, **99**, 223–231.
- 6 J. Wang, B. He, D. Yan and X. Hu, Implementing ecopharmacovigilance (EPV) from a pharmacy perspective:

- A focus on non-steroidal anti-inflammatory drugs, *Science of The Total Environment*, 2017, **603–604**, 772–784.
- 7 M. Mezzelani, S. Gorbi and F. Regoli, Pharmaceuticals in the aquatic environments: Evidence of emerged threat and future challenges for marine organisms, *Marine Environmental Research*, 2018, **140**, 41–60.
  - 8 A. Singh, A. Shourie and S. Mazahar, Integration of Microalgae-Based Wastewater Bioremediation–Biorefinery Process to Promote Circular Bioeconomy and Sustainability: A Review, *CLEAN Soil Air Water*, 2023, **51**, 2100407.
  - 9 L. Ercoli, R. Rossetto, S. Di Giorgi, A. Raffaelli, M. Nuti and E. Pellegrino, Effective bioremediation of clarithromycin and diclofenac in wastewater by microbes and *Arundo donax* L, *Environ Sci Pollut Res*, 2023, **30**, 77193–77209.
  - 10 T. Hata, S. Kawai, H. Okamura and T. Nishida, Removal of diclofenac and mefenamic acid by the white rot fungus *Phanerochaete sordida* YK-624 and identification of their metabolites after fungal transformation, *Biodegradation*, 2010, **21**, 681–689
  - 11 R. Cruz-Ornelas, J. E. Sánchez-Vázquez, L. Amaya-Delgado, K. Guillén-Navarro and A. Calixto-Romo, Biodegradation of NSAIDs and their effect on the activity of ligninolytic enzymes from *Pleurotus djamor*, *3 Biotech*, 2019, **9**, 373.
  - 12 A. I. Rodarte-Morales, G. Feijoo, M. T. Moreira and J. M. Lema, Degradation of selected pharmaceutical and personal care products (PPCPs) by white-rot fungi, *World J Microbiol Biotechnol*, 2011, **27**, 1839–1846.
  - 13 Y. El Yagoubi , B. Lemieux , P. A. Segura and H. Cabana, Characterization of laccases from *Trametes hirsuta* in the context of bioremediation of wastewater treatment plant effluent, *Enzyme and Microbial Technology*, 2023, **171**, 1–12.
  - 14 T. K. Kasonga, M. A. A. Coetzee, C. Van Zijl and M. N. B. Momba, Removal of pharmaceutical’ estrogenic activity of sequencing batch reactor effluents assessed in the T47D-KBluc reporter gene assay, *Journal of Environmental Management*, 2019, **240**, 209–218.
  - 15 M. Hultberg, L. Ahrens and O. Golovko, Use of lignocellulosic substrate colonized by oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) for removal of organic micropollutants from water, *Journal of Environmental Management*, 2020, **272**, 111087.

# A indústria têxtil e a emissão de gases do efeito estufa: efeitos da produção de tecidos, *Fast Fashion* e *Slow Fashion*

DOI: 10.5281/zenodo.11089822

Victoria Pires da Silva<sup>a\*</sup>

The emission of greenhouse gases is increasing and the temperature of the planet rises at a worrying rate. Industries, especially textiles, play a large role in this context. *Fast Fashion* is a model of production and consumption that brings speed and accessibility to clothes, at the expense of quality, service life and the environment. *Slow Fashion* is a sustainable alternative, with higher quality of clothing and shelf life, but the high prices associated with the model are a hindrance. In the analysis of the production chain of a luxury fashion company in Italy, it is possible to observe which sectors contribute to the highest greenhouse gas emissions, focusing on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). The use by consumers and the production of the fibers of the fabrics, as well as the type of fiber manufactured, are factors that influence the amount of CO<sub>2</sub> emissions. However, the prices associated with fibers such as cotton, polyester, silk, nylon and wool explain why *Fast Fashion* remains the most present model in today's society.

A emissão de gases do efeito estufa está cada vez maiores e a temperatura do planeta se eleva em um ritmo preocupante. As indústrias, principalmente a têxtil, possuem um grande papel nesse contexto. O *Fast Fashion* é um modelo de produção e consumo que traz rapidez e acessibilidade às roupas, em detrimento da qualidade, vida útil e do meio ambiente. O *Slow Fashion* é uma alternativa sustentável, com maiores qualidade de vestuário e vida útil, porém os preços altos associados ao modelo são um obstáculo. Na análise da cadeia produtiva de uma empresa de moda de luxo da Itália, é possível observar quais setores contribuem com as maiores emissões de gases do efeito estufa, com enfoque no dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O uso pelos consumidores e a produção das fibras dos tecidos, assim como o tipo de fio fabricado, são fatores que influenciam na quantidade de emissões de CO<sub>2</sub>. Entretanto, os preços associados às fibras como o algodão, o poliéster, a seda, o nylon e a lã explicam o porquê do *Fast Fashion* continuar sendo o modelo mais presente na sociedade atual.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: vickiprs@gmail.com

**Palavras-chave:** Efeito estufa; CO<sub>2</sub>; *Fast Fashion*; Fibras; Produção;

Aceito em 22 de março de 2024,  
Aprovado em 26 de abril de 2024,  
Publicado 01 de maio de 2024.

## Introdução

O aquecimento global e suas consequências catastróficas são duas das maiores preocupações e desafios da sociedade atual. De acordo com o relatório da Organização Meteorológica Mundial (OMM), 2023 foi o ano com a maior temperatura média global registrada, 1,45° Celsius acima da temperatura pré-industrial. O aumento do nível médio do mar e da quantidade de gases do efeito estufa emitidos também apresentaram números alarmantes e recordes históricos.<sup>2</sup> Pesquisas e dados da Agência Internacional de Energia (AIE) mostram que entre os anos de 2019 e 2022, os setores que mais contribuíram na emissão de gases do efeito estufa foram, respectivamente, os setores de energia, indústria, transporte e construção.<sup>3</sup> As indústrias sempre foram motivo de grande preocupação pela sua influência no aquecimento global e, entre seus setores, a indústria da moda é uma das maiores responsáveis por essas emissões. Estima-se que anualmente sua contribuição seja de 10% em relação as emissões globais de gases do efeito estufa,

com 1.7 bilhões de toneladas de dióxido de Carbono emitidas.<sup>4,5</sup>

A cultura de consumo e a produção em massa influenciam diretamente no sistema de produção utilizado e no consequente aumento da pegada de carbono do indivíduo e da indústria. Desde o ano 2000, houve um aumento de 60% na média de compra de roupas por consumidor. Com isso, a demanda do mercado consumidor da indústria da moda aumentou, junto a maior rapidez na mudança de tendências e a necessidade da diminuição dos preços de cada peça, o que ocasionou na prevalência do chamado *Fast Fashion*. O *Fast Fashion* está associado a uma maior emissão de carbono, isso ocorre devido às suas características de produção em alta frequência de peças em larga escala, menor qualidade de material, menor tempo de vida útil e menor preço associado. Em contrapartida, há um maior incentivo de instituições sociais, tais como a Fundação Ellen MacArthur, ao chamado *Slow Fashion*, com produções em uma menor frequência e sob medida, com maior qualidade do material utilizado, maior tempo de vida útil e maior preço associado.<sup>1,7</sup>

Com o crescimento das novas gerações, os aspectos ambientais e éticos da produção e venda de roupas começaram a se tornar significativos no mercado. Contudo, apesar dessa maior consciência ambiental, o valor final do produto continua fomentando o consumo do *Fast Fashion*.<sup>8</sup>

Landi *et al.*<sup>1</sup> em sua pesquisa fez um inventário de todos os processos produtivos indiretos e diretos e suas respectivas emissões de gases do efeito estufa em uma empresa de moda de pequeno a médio porte na Itália. Com esse estudo de caso, é possível observar em quais etapas de produção estão a maior urgência de mudança e como o tipo de tecido utilizado nesse nicho influencia na quantidade de emissões de gases como o dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>.<sup>1</sup>

## Metodologia

No artigo utilizado como referência para esta resenha, Landi *et al.*<sup>1</sup> analisou os dados, tais como documentos e extratos financeiros, do sistema de gerenciamento de uma empresa de moda de luxo da Itália pelo período de 1 ano. A análise desses dados seguiu a norma ISO 14064-1 do ano de 2019 da International Organization for Standardization (ISO), que versa sobre os gases do efeito estufa e a organização para sua quantificação, remoção e relatórios.<sup>9</sup>

As emissões de gases foram quantificadas e classificadas em seis categorias: emissões e remoções diretas, emissões indiretas advindas de energia, emissões indiretas advindas de transporte, emissões indiretas advindas do uso de produtos pela empresa, emissões indiretas advindas do uso de produtos produzidos pela empresa e emissões indiretas advindas de outras fontes. Informações como emissões relacionadas as últimas etapas de produção e o posterior uso foram aproximadas com base em uma revisão da literatura e a opinião de especialistas. Os cálculos necessários para quantificar as emissões foram feitos com o auxílio do Software SimaPro 9.1.1.1, em conjunto com o Ecoinvent 3.6.

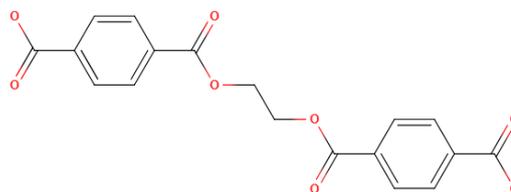
## Resultados e discussão

As fibras de tecidos utilizados na produção têxtil são classificadas de acordo com sua origem em duas principais categorias: as naturais, muito associadas à produção sustentável, e as sintéticas, associadas à produção em massa. As sintéticas são aquelas que, durante sua produção, não eram fibras e houve uma modificação estrutural e de suas outras propriedades, elas advêm de combustíveis fósseis, tais como o

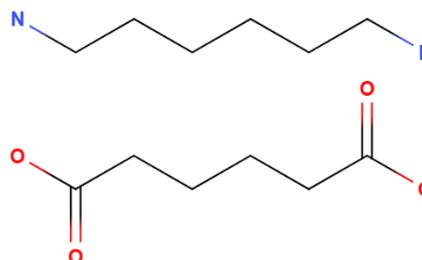
petróleo, e não são biodegradáveis, elas são muito utilizadas no *Fast Fashion* devido ao seu baixo custo de produção. Entretanto, também são responsáveis por uma parcela significativa da poluição e emissão de gases do efeito estufa na indústria têxtil.<sup>10</sup>

Alguns exemplos de fibras artificiais são o poliéster e o nylon, responsáveis, respectivamente, pela emissão de 5357 kg e 8070 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de fio.<sup>11</sup> Entre os dois poliésteres mais usados comercialmente estão o PET, ou *Polyethylene Terephthalate* e o PBT, ou *Polybutylene terephthalate*.<sup>12</sup> Já entre a fibra de nylon, os dois mais utilizados comercialmente são o nylon-6 e o nylon-6,6.<sup>13</sup>

**Figura 1.** Monômero que compõe o poliéster Polyethylene Terephthalate (PET).



**Figura 2.** Monômeros que compõem o nylon-6 e o nylon-6,6.

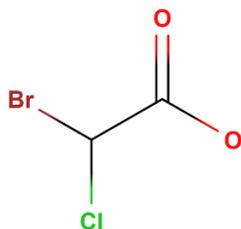


As fibras naturais são aquelas que existem de forma natural e que durante sua produção, suas propriedades e estrutura não mudam drasticamente. Também chamadas de *Manmade Fibers*, elas são produzidas pelo processamento de polímeros naturais ou orgânicos sintéticos. Alguns exemplos de tecidos com fios naturais muito utilizados no mercado são a lã, o algodão e a seda.<sup>10</sup> Essas fibras são responsáveis, respectivamente, pela emissão de 20790 kg, 1755 kg e 2031 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de fio.<sup>11</sup>

A lã é composta por uma única proteína, a queratina, e outros 20 aminoácidos, com cadeias poliméricas na forma de hélice, o que contribui para certas características do tecido,

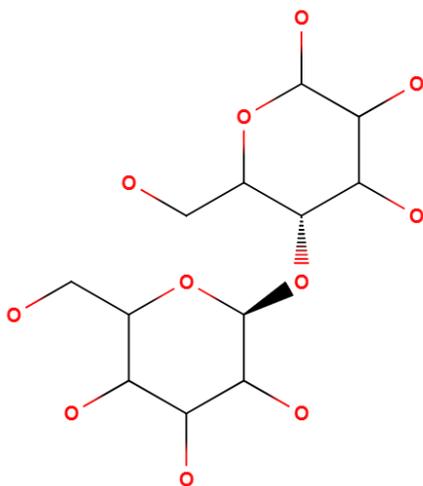
como a sua elasticidade reversível. A alta emissão de Carbono dessa fibra está associada principalmente a sua produção.<sup>14</sup>

**Figura 3.** Queratina que compõe a cadeia polimérica da lã.



O algodão é uma fibra natural composta primariamente pelo polissacarídeo celulose e outros compostos e funções orgânicas, tais como a hidroxila. Ele é um fio com característica hidrofílica e pode ser facilmente modificada para diferentes aplicações.<sup>15</sup>

**Figura 4.** Monômero que compõe o polissacarídeo celulose.



A seda é um polímero natural, composto principalmente pelas proteínas fibroína e sericina, proteínas essas compostas por aminoácidos como a glicina, ácido aspártico, treonina e serina. A seda é muito conhecida por sua relação com o bicho-da-seda, ou *Bombyx mori*, pois é extraída do casulo desse inseto.<sup>16</sup>

Em uma empresa de moda de luxo de pequeno a médio porte na Itália, a produção de itens no período de 1 ano foi de 485193, com peças como vestidos, sapatos, bolsas e outros. Ao considerar o sistema produtivo e cada etapa a partir da produção de matéria-prima até o posterior uso do

consumidor, as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em um ano na fabricação das 485193 mil peças de vestuário atingiram cerca de 9804 toneladas. No sistema de produção e na quantificação das emissões de gases do efeito estufa nessa empresa, com enfoque no dióxido de carbono, foram analisadas e calculadas as emissões indiretas e diretas relacionadas a diversas etapas da cadeia produtiva, tais como o transporte de funcionários e a aquisição de embalagens. Contudo, os maiores responsáveis pela pegada de carbono da empresa estão associados à matéria-prima do fio, à produção do tecido na indústria têxtil e ao uso pelos consumidores.<sup>1</sup>

Os materiais que serão utilizados têm grande impacto sobre as emissões da indústria têxtil, dentre os tecidos, a lã é o produto mais usado, mas como está associada à criação de ovelhas em fazendas, em seu processo de produção essa matéria-prima é responsável por mais de 70% das emissões de CO<sub>2</sub> entre as fibras. Dentre os outros tecidos mais comprados no mercado de luxo, estão o algodão orgânico, o algodão e a seda, a qual possui o número mais alarmante quando se trata das emissões de dióxido de carbono nessa empresa, cerca de 1153,5 toneladas emitidas.<sup>1</sup>

Ao considerar as emissões de gases do efeito estufa, principalmente o carbono, é importante considerar também o custo do tecido. No caso do mercado de luxo, são utilizadas fibras naturais, muitas das quais são biodegradáveis. Apesar disso, o valor expressivo delas, principalmente daquelas mais usadas apenas no mercado de luxo, são um empecilho quando se trata da mudança de hábitos e da moda sustentável. De acordo com a análise e coleta de dados feitas pelo Business Analityq, em março de 2024 o custo das fibras utilizadas no mercado têxtil é de 1,32 US\$/Kg para o poliéster PET, 3,53 US\$/Kg para o nylon 66, 4,1 US\$/KG para o algodão, 0,57 US\$/Kg para a lã e 86,17 US\$/Kg para a seda.<sup>17, 18, 19, 20, 21</sup>

## Conclusões

O aquecimento global, causado pela excessiva emissão de gases do efeito estufa, é uma preocupação urgente da sociedade e as indústrias têm um papel significativo para a redução dessas emissões. A indústria da moda é uma das grandes responsáveis pelo consumismo e consequente emissão desses gases, o chamado *Fast Fashion* e a rapidez e consumo associados a ele devem ser combatidos e, para isso, há o incentivo para o chamado *Slow Fashion*. No artigo de Landi *et al.*, é possível observar toda a cadeia produtiva de uma empresa de vestuário de luxo localizada na Itália, desde a produção da matéria-prima até o fim da vida útil do produto. Também é

possível observar no artigo como o tipo de fibra utilizado, no caso principalmente a seda, o algodão e a lã estão relacionados a grande emissão de CO<sub>2</sub> da empresa.<sup>1</sup>

De fato, a fibra e seu processo de fabricação têm grande impacto na poluição gerada pela indústria têxtil, tanto aquelas relacionadas a emissão de gases do efeito estufa, como aquelas relacionadas à biodegradabilidade, ou à falta dela. Materiais sintéticos como o poliéster e o nylon são grande preocupação e até mesmo a lã, que apesar de ser uma fibra natural, advém da criação de ovelhas que emite alarmantes quantidade de CO<sub>2</sub>. Esses materiais têm um custo mais baixo comparados a seda e até mesmo ao algodão e, por isso, costumam ser mais utilizados na indústria como uma forma de diminuir o valor dos produtos e torna-los mais acessíveis às massas, como no *Fast Fashion*.

O incentivo ao *Slow Fashion* possui grande importância, mas a acessibilidade dos preços dos materiais mais sustentáveis é um problema que precisa ser solucionado. A indústria de moda de luxo é responsável pelas tendências, mas também pela exclusividade e conseqüentemente pelos altos preços associados aos tecidos. O exemplo da empresa de moda de luxo na emissão de CO<sub>2</sub> mostra quais setores da cadeia produtiva necessitam de mais atenção para a diminuição das emissões de gases do efeito estufa, porém outros fatores devem ser considerados para a diminuição na indústria têxtil.

## Contribuições por Autor

O artigo e a inclusão de algumas observações são de Victoria Pires.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB/MEC, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 F. F. De Albuquerque Landi, C. Fabiani, B. Pioppi and A. L. Pisello, Sustainable management in the

slow fashion industry: carbon footprint of an Italian brand, *Int J Life Cycle Assess*, 2023, **28**, 1229–1247.

- 2 Climate change indicators reached record levels in 2023, <https://wmo.int/media/news/climate-change-indicators-reached-record-levels-2023-wmo>, (accessed 23 March 2024).
- 3 Global CO<sub>2</sub> emissions by sector, 2019-2022 – Charts – Data & Statistics, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2019-2022>, (accessed 23 March 2024).
- 4 <https://unfccc.int/news/un-helps-fashion-industry-shift-to-low-carbon>, (accessed 23 March 2024).
- 5 P. Centobelli, S. Abbate, S. P. Nadeem and J. A. Garza-Reyes, Slowing the fast fashion industry: An all-round perspective, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2022, **38**, 100684
- 6 D. Drew and G. Yehounme, The Apparel Industry's Environmental Impact in 6 Graphics.
- 7 The price of fast fashion, *Nature Clim Change*, 2018, **8**, 1–1.
- 8 A. Paço, W. Leal Filho, L. V. Ávila and K. Dennis, Fostering sustainable consumer behavior regarding clothing: Assessing trends on purchases, recycling and disposal, *Textile Research Journal*, 2021, **91**, 373–384.
- 9 14:00-17:00, ISO 14064-1, <https://www.iso.org/standard/66453.html>, (accessed 23 March 2024).
- 10 M. M. Houck, Ed., *Identification of textile fibers*, CRC Press [u.a.], Boca Raton, Fla., Reprint., 2010.
- 11 S. Moazzem, E. Crossin, F. Daver and L. Wang, Baseline Scenario of Carbon Footprint of Polyester T-Shirt, *JFBI*, 2018, **11**, 1–14.
- 12 Polyester | Synthetic Fibers, Textiles, Clothing | Britannica, <https://www.britannica.com/science/polyester>, (accessed 23 March 2024).
- 13 B. L. Deopura and A. K. Mukherjee, in *Manufactured Fibre Technology*, eds. V. B. Gupta and V. K. Kothari, Springer Netherlands, Dordrecht, 1997, pp. 318–359.
- 14 M. Datta, G. Basu and S. Das, in *Handbook of Natural Polymers, Volume 1*, Elsevier, 2023, pp. 441–469.
- 15 I. Lugolobi and H. Memon, in *Cotton Science and Processing Technology: Gene, Ginning, Garment and*

*Green Recycling*, eds. H. Wang and H. Memon, Springer, Singapore, 2020, pp. 417–432.

- 16 M. Saad, L. M. El-Samad, R. A. Gomaa, M. Augustyniak and M. A. Hassan, A comprehensive review of recent advances in silk sericin: Extraction approaches, structure, biochemical characterization, and biomedical applications, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, **250**, 126067.
- 17 Mike, Polyester price index, <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/polyester-price-index/>, (accessed 23 March 2024).
- 18 Mike, PA66 (Nylon 66) price index, <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/pa66-price-index/>, (accessed 23 March 2024).
- 19 Mike, Cotton price index, <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/cotton-price-index/>, (accessed 23 March 2024).
- 20 Mike, Wool price index, <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/wool-price-index/>, (accessed 23 March 2024).
- 21 Mike, Raw Silk price index, <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/raw-silk-price-index/>, (accessed 23 March 2024).

# Etanol combustível: uma revisão acerca dos testes para avaliar sua qualidade

DOI: 10.5281/zenodo.11089830

Linara Tarusa D. Correa<sup>a\*</sup>

Ethanol fuel is one of the most used biofuels in the world. In Brazil, it gained a lot of prominence due to the country's energy availability to produce this product from sugar cane and the great incentive of the Proálcool program. However, there are several adulterations associated with this product. Therefore, to guarantee the quality of the fuel that reaches the consumer, tests are necessary to evaluate the quality of the product. Among the main tests are the analysis of color and appearance, pH, electrical conductivity, specific mass and hydrocarbon content.

O etanol combustível é um dos biocombustíveis mais utilizados no mundo. No Brasil ele ganhou muito destaque devido a disponibilidade energética do país de produzir esse produto a partir da cana de açúcar e do grande incentivo do programa Proálcool. Contudo, existem diversas adulterações associadas a esse produto. Dessa forma, para garantir a qualidade do combustível que chega para o consumidor são necessários ensaios para avaliar a qualidade do produto. Dentre os principais ensaios se encontram a análise de cor e aspecto, pH, condutividade elétrica, massa específica e teor de hidrocarbonetos.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: linara.tarusa@gmail.com

**Palavras-chave:** etanol; biocombustível; qualidade; adulteração.

Aceito em 23 de março de 2024,  
Aprovado em 26 de abril de 2024,  
Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

O etanol é um biocombustível, sendo importante ressaltar que essa classificação é atribuída a combustíveis que são produzidos a partir da biomassa, ou seja, matéria orgânica de origem animal ou vegetal. Diferente dos combustíveis fósseis tradicionais como a gasolina, o biocombustível, além de ser mais em conta financeiramente, também auxilia muito na preservação do meio ambiente, neutralizando a pegada de carbono e reduzindo a emissão de gases do efeito estufa, também conhecidos como GEE, na atmosfera. Assim, tecnologia de conversão de biomassa em açúcares fermentáveis para a produção de etanol é apontada como uma rota promissora para atender a demanda mundial por combustíveis.<sup>1-3</sup>

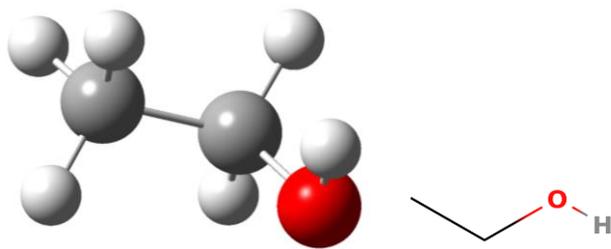
O etanol combustível é o biocombustível mais utilizado no país, sendo que a sua produção e uso proporcionam uma redução significativa no consumo de derivados de petróleo. Dessa forma, a ascensão do etanol ocorreu na década de 70 devido a crise mundial de petróleo com elevação do preço dos combustíveis fósseis a valores exorbitantes. O governo brasileiro direcionou esforços para o desenvolvimento de um combustível alternativo para motores ciclo Otto, culminando com a criação do Proálcool em 1975 para estimular a indústria sucroalcooleira.<sup>4,5</sup> Portanto, desde esse período, o Brasil foi abastecido com mais de 637 bilhões de litros de etanol que substituíram de cerca de 2,4 bilhões de

barris de petróleo, ocasionando em uma significativa redução da emissão de gases de efeito estufa.<sup>6</sup>

Com relação ao aspecto produtivo, no Brasil o etanol é obtido principalmente através da fermentação de açúcares presentes na cana-de-açúcar. O processo produtivo consiste em primeiro triturar e moer a cana para obtenção de garapa, uma espécie de caldo com alto teor de sacarose. Em seguida, a garapa é dividida em duas porções e passa por um processo de cristalização. A primeira porção tem como objetivo formar o açúcar escuro, utilizado para produzir o açúcar alimentício tradicional. A segunda porção gera o melaço, utilizado para produzir o álcool. A fermentação do melaço dá origem ao mosto, produto com uma concentração de 12% de etanol. Por fim, o produto é destilado a fim de obter álcool comum a 96°GL, ou seja, 96 graus Gay-Lussac, que é composto por 96% de etanol e 4% de água.<sup>7,8</sup>

Existem três tipos de etanol utilizados para o abastecimento de veículos, sendo eles o etanol comum obtido a partir da destilação do mosto, o etanol aditivado e etanol anidro. É importante ressaltar que mesmo variando os tipos, todos são a mesma substância  $C_2H_6O$ , como mostra a Figura 1, mudando apenas a graduação alcoólica.<sup>7</sup>

**Figura 1.** Representação tridimensional (a) e bidimensional (b) gerada respectivamente pelos programas GaussView<sup>9</sup> e Molview.



No que tange o etanol anidro, ele é o produto misturado na gasolina com o objetivo de aumentar o índice de octanagem da gasolina e diminuir a emissão de gases e do efeito estufa, como monóxido de carbono (CO) liberado na queima incompleta do combustível.<sup>10</sup> Em contrapartida, o consumo do combustível aumenta visto que o etanol rende menos que a gasolina, além de favorecer a produção óxidos de nitrogênio que ao reagir com a água presente na atmosfera gera ácido nítrico, responsável pela chuva ácida.

De acordo com as diretrizes estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), e em conformidade com a Portaria Nº 75, de 5 de março de 2015, expedida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), bem como a Resolução Nº 1, de 4 de março de 2015,<sup>11</sup> do Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA), o teor máximo de álcool etílico anidro permitido na gasolina comum é de 27%, com uma tolerância de variação de 1% para mais ou para menos.

O principal determinante para o percentual de etanol anidro na gasolina é a política econômica nacional e a inserção do país no mercado global. Dessa forma, em períodos em que o açúcar apresenta valor elevado no mercado internacional, a produção de etanol no Brasil tende a reduzir. Como resultado, o teor de etanol adicionado à gasolina comum também será reduzido, uma vez que os esforços produtivos estarão direcionados prioritariamente à produção de açúcar.

A legislação mais recente sobre a especificação do álcool anidro é a mesma do álcool hidratado, ou seja, o Regulamento Técnico ANP nº3/2011, anexo da Resolução ANP Nº 907 de 23 de novembro de 2022.<sup>12</sup> A resolução traz algumas diferenças significativas entre os produtos, como por exemplo a coloração, sendo que o etanol anidro deve ser alaranjado, enquanto o hidratado comum em geral é transparente. Outra diferença é com relação ao teor alcoólico, o anidro precisa conter, no mínimo, 99,6% de álcool puro.

O etanol hidratado comum, como o próprio nome sugere, é aquele que é adicionado à água, sendo esse o etanol utilizado no abastecimento de veículos, assim ele precisa ter 95,1% a 96% de graduação alcoólica. Contudo, esse produto possui diversos casos de fraude, sendo a adulteração mais comum a adição de água em quantidade maior que o permitido pelas normas da ANP, dessa forma alguns comerciantes compram o etanol anidro e adicionam água sem controle do teor para vender o produto final como etanol hidratado.<sup>13,14</sup> Justamente por isso, a ANP tornou obrigatório, através da Resolução ANP nº 7/2011,<sup>12</sup> que se adicione corante de tonalidade laranja ao etanol anidro a fim de dificultar a fraude e a identificação do combustível, além disso é importante ressaltar que o corante escolhido não é solúvel em água.

Já o etanol aditivado é composto por álcool hidratado ao qual são adicionados aditivos que melhoram o rendimento e reduzem o desgaste do motor, melhorando sua lubrificação. Essa melhoria é necessária devido à menor capacidade lubrificante do álcool hidratado em comparação com o álcool anidro, consequência da presença de água. Esta condição pode diminuir a vida útil do motor. A inclusão de lubrificantes no etanol aditivado visa minimizar essa deficiência. Assim, o etanol aditivado opera com o mesmo princípio da gasolina aditivada, sendo um combustível convencional enriquecido com substâncias que aprimoram sua qualidade, cuja aditivação é identificada pela coloração verde. É crucial destacar que a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) não regula a aditivação.<sup>15</sup>

É importante ressaltar que para serem vendidos, todos os tipos de álcoois supracitados precisam cumprir as especificações estabelecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) com relação as suas características físico-químicas, a fim de manter o controle de qualidade dos produtos comercializados no país de modo que tenham o desempenho esperados para a segurança do veículo, consumidor e meio ambiente. No caso do etanol, algumas especificações são que os produtos supracitados precisam ser límpidos, com a respectiva coloração e teor alcoólico definidos pela agência, isento de impurezas, PH neutro, entre outros fatores. A tabela 1 mostra a relação das especificações com a respectiva norma nacional e internacional.

**Tabela 1.** Ensaios, normas e faixa de aceitação do etanol combustível

Característica	Método	Faixa de aceitação
Aspecto	NBR 14954	Limpo e isento de impurezas
Cor	-	A depender do produto
Massa específica 20°C	NBR 5992	807,6 a 811,0 kg/m <sup>3</sup> para etanol hidratado comum, 799,8 e 802,7 kg/m <sup>3</sup> para etanol premium. Máximo 791,5 Kg/m <sup>3</sup> para etanol anidro
Teor alcoólico	NBR 5992	95,1 e 96 °GL para etanol hidratado comum e anidro, 97,1 e 98,6% para etanol premium
Condutividade	NBR 10547	máximo 300 µS/m
pH	NBR 10891	entre 6,0 e 8,0
Teor de hidrocarboneto	NBR 13993	<2,0

Assim, o artigo em referência<sup>16</sup> fez a avaliação de algumas amostras de etanol coletadas na cidade de São Paulo, realizando os mesmo teste de qualidade exigidos pela ANP a fim de obter uma relação de conformidade ou não dos produtos em estudo.

## Metodologia

No artigo em referência<sup>16</sup> foram coletadas amostras de etanol hidratado de 4 bandeiras em 3 postos distintos. É importante ressaltar que a coleta foi feita em galões de 1000 mL regulamentados pelo INMETRO, identificados e armazenados em ambiente limpo, seco e longe de incidência solar até o momento das análises.

O primeiro ensaio realizado foi o aspecto através do método visual com o objetivo de ver se as amostras estavam límpidas e isentas de impureza (LII). A análise cor também compõe o ensaio, dessa foi observado se os produtos estavam incolores, cor padrão. A análise de potencial de hidrogênio (pH) foi feita tomando como base a norma NBR 10891.<sup>17</sup>

Assim, os autores utilizaram um potenciômetro digital da marca Gehaka, modelo PG1800. A análise de condutividade elétrica máxima foi tomando como referência a norma NBR 10547,<sup>18</sup> assim foi utilizado um condutivímetro digital da marca Gehaka, modelo CG1800. As análises de massa específica e teor alcoólico foram feitas tomando como base a NBR 5992,<sup>19</sup> assim utilizou-se o método do densímetro de vidro. Por fim, a análise de teor de hidrocarbonetos máximo, normatizada pela NBR 13993,<sup>20</sup> foi realizada pelo método volumétrico.

## Resultados e discussão

O primeiro ensaio realizado pelo autor foi o de cor e aspecto, sendo importante ressaltar que esse tipo de análise é feita de forma qualitativa com base no atributo sensorial da visão do analista.

Conforme especificado pelo regulamento técnico ANP nº3/2011,<sup>12</sup> a coloração do etanol comum deve ser incolor, contudo o etanol levemente amarelo está dentro da coloração aceitável. Já o etanol aditivado é caracterizado pela coloração verde. A mudança de coloração de incolor para verde tem como finalidade a identificação mais fácil do produto aditivado quando comparado com a versão comum.<sup>12</sup> Dessa forma, é exigido que o produto em análise, além de possuir a sua específica coloração esteja límpido e isento de impurezas, abreviado por LII, sendo que dentre as principais impurezas estão a presença de material particulado e água livre, ou seja, quando existe separação de fase na amostra.

A adição de água ao combustível é realizada como uma forma de adulteração, uma vez que a água tem baixo custo e não altera a coloração do combustível.<sup>21</sup> No caso do etanol, a análise de água livre é muito dificultada visto que a presença do grupo OH em sua composição faz com que o etanol se torne uma substância polar se misturando mais facilmente com a água e demais líquidos que polares.<sup>22</sup> Para isso, outros ensaios podem ser utilizados para identificar a presença de água em excesso no produto, sendo o principal deles a condutividade ou titulação condutométrica pelo método de Karl-Fischer.

A norma explica detalhadamente como deve ser realizado o ensaio. Dessa forma, é necessário uma prova de 1 L sem graduação, visto que os detalhes no vidro podem comprometer a análise visual. Também é necessário um bastão de vidro a fim de agitar a amostra, caso esteja presente material particulado eles serão mais facilmente notados. Por fim, é necessário no mínimo 500 mL de amostra. O procedimento experimental consiste em despejar toda a amostra na proveta,

agitá-la com o bastão de vidro e analisar se está dentro de cor e aspecto característica do produto. Na avaliação feita pelos autores, todos os produtos em estudo se encontravam conforme com a especificação, ou seja, limpos e isentos de impureza. Além da coloração dentro do esperado, ou seja, incolor.

O segundo ensaio realizado foi o de pH, cujo resultado deve situar-se entre 6,0 e 8,0. Este ensaio é de extrema importância, uma vez que o pH está diretamente relacionado aos processos corrosivos das partes metálicas do veículo, bem como dos tanques de transporte e armazenamento do biocombustível. Essa relação ocorre devido à adição de ácidos minerais durante o processo produtivo do biocombustível, particularmente na etapa de fermentação alcoólica, com o intuito de inibir a proliferação de microrganismos. Adicionalmente, pode ocorrer a oxidação espontânea do etanol, resultando na formação de ácido acético, o que amplifica a corrosividade do produto.<sup>23,25</sup>

É fundamental destacar que o uso de ligas de alumínio na indústria automotiva tem aumentado nos últimos anos. Isso se deve ao fato de que o alumínio contribui para a melhoria da eficiência do veículo e para a redução dos processos vibratórios do automóvel. Esses aspectos ressaltam ainda mais a importância do ensaio de pH, dada a susceptibilidade do alumínio à corrosão.<sup>24,25</sup>

Adicionalmente, conforme apontado por Rosseti, um dos impactos mais adversos da utilização do etanol é a sua baixa lubrificidade. Isso pode resultar em uma redução na vida útil de componentes críticos do motor, como válvulas, guias e anéis de segmento, em comparação com um motor que utiliza gasolina. Normalmente, esses componentes são lubrificados pelo combustível ao serem injetados na câmara de combustão.<sup>26</sup>

Assim, no artigo em referência,<sup>16</sup> as análises de pH se mostraram conformes na maioria dos casos, sendo que a média foi de pH 7,0. Como informado pelo autor, apenas as amostras A<sub>3</sub>, B<sub>2</sub> e B<sub>3</sub> ultrapassaram os limites de pH aceitos sendo seus valores respectivamente 8,26, 8,07 e 8,01. Isso mostra que a maioria dos postos e bandeira analisados estavam dentro de um parâmetro muito importante do etanol combustível.

O terceiro ensaio realizado foi a condutividade. Diferentemente do metal, material em que a corrente elétrica é transportada por elétrons livres, no caso do etanol, o transporte é realizado através dos íons presentes na sua composição. É importante ressaltar que todos os íons presentes no produto, ou

seja o OH<sup>-</sup>, participam da condução e, por isso, pode-se afirmar que a condutividade fornece uma informação global do combustível, por natureza não específica quando comparado por exemplo ao ensaio de pH que indica a concentração de H<sup>+</sup>.

A condutividade varia com a concentração total de substância ionizadas dissolvida, isso implica no fato de que quando existe um solvente muito polar misturado ao produto, ocorre o aumento da condutividade. No caso do etanol, a condutividade máxima permitida é de 300 µS/m. Portanto, esse ensaio busca verificar a contaminação da amostra pela adição de água, ou de compostos iônicos solúveis ao combustível, visto que o álcool é um condutor de eletricidade, porém, a água tem maior capacidade de conduzir a energia.<sup>27,28</sup>

Outro fator importante a ser ressaltado é que para averiguar essa propriedade físico-química, é necessário que exista um controle de temperatura durante o ensaio, visto que a condutividade eletrolítica aumenta com a temperatura. Isso ocorre devido ao aumento da mobilidade. De modo geral esse efeito ocorre devido ao aumento da mobilidade dos íons aumenta.<sup>27,28</sup>

Portanto, no artigo em referência,<sup>16</sup> os autores averiguaram que todas as amostras analisadas em todas as bandeiras apresentaram uma condutividade mais ou menos duas vezes maior que o permitido pela ANP. Dessa forma, a média geral foi de 720 µS/m. Isso demonstra a importância de uma fiscalização rigorosa e frequente visto que os produtos muito provavelmente estavam contaminados com água ou com outro solvente polar, alterando drasticamente a característica do produto.

O quarto teste realizado foi de massa específica, e teor alcoólico sendo que ela consiste na massa de uma substância contida em um volume a uma dada temperatura. Usualmente, essa medida é confundida com a densidade, contudo a densidade é adimensional, visto que é a divisão da massa específica da amostra sobre a massa específica da água que é aproximadamente um.

Assim, devido a sua composição química, ou seja, dois átomos de carbono, um átomo de oxigênio e um átomo de hidrogênio, o etanol é um composto orgânico muito leve e o combustível mais leve, possuindo assim uma massa específica baixa.

Em todo teste de qualidade de combustível é essencial ser feito a análise da massa específica visto que ela é um forte indicativo de contaminação na amostra ou pureza da amostra. Caso o produto não esteja puro, a massa específica

mudará drasticamente a depender da composição do contaminante. É importante ressaltar que nesse caso o controle de temperatura também é importante. A análise deve ser feita a 20°C visto que o produto é extremamente volátil, portanto em temperaturas mais elevadas, o etanol perde parte de seus componentes, alterando assim a sua densidade.

Assim, o etanol hidratado deve apresentar uma densidade compreendida entre 807,6 e 811,0 kg/m<sup>3</sup> a 20°C. Se essa densidade variar entre 799,8 e 802,7 kg/m<sup>3</sup>, o produto pode ser comercializado como premium, desde que satisfaça aos requisitos de teor alcoólico. Consequentemente, o teor alcoólico do etanol hidratado convencional deve situar-se entre 95,1 e 96 °GL. Para ser classificado como premium, além da densidade inferior, o etanol deve possuir uma massa entre 95,5 e 97,7% e um volume entre 97,1 e 98,6% quando comercializado. Quanto ao etanol anidro, sua densidade deve ser no máximo 791,5 kg/m<sup>3</sup>, sem especificação de um limite mínimo.

No caso do teor alcoólico, ele é importante para atestar um etanol com qualidade, visto que um valor de teor alcoólico dentro das especificações pode significar que a produção do combustível teve controle da matéria-prima e da fermentação. Nesse caso, os ensaios realizados pelos autores foram feitos apenas para o etanol hidratado comum, sendo que a maioria das amostras se encontraram dentro do esperado para massa específica e teor alcoólico, apenas a amostra C<sub>1</sub> se encontrou abaixo da massa específica e acima do teor alcoólico.

Por fim, o último teste realizado foi o de teor de hidrocarbonetos. Para a execução deste teste, é necessária uma proveta de vidro de 100 mL, graduada em subdivisões de 1 mL, com boca esmerilhada e tampa, conforme as condições estabelecidas pelo INMETRO, além de uma solução aquosa de cloreto de sódio a 10% peso/volume, ou seja, 100 g de sal para cada litro de solução.

O procedimento do ensaio é idêntico ao teste de prova para a gasolina. Assim, o procedimento consiste em adicionar 50 mL da amostra na proveta previamente limpa e seca, observando a parte inferior do menisco para assegurar que o volume foi medido corretamente. Feito isso, completa-se a proveta, ou seja, é feito a adição de mais 50 mL da solução de cloreto de sódio até o menisco. Por fim, é necessário misturar as camadas de solução e amostra através de 10 inversões sucessivas da proveta. O tempo de espera é de 5 minutos com a proveta em repouso. Depois analisa-se a variação de volume superior.

O método em destaque é conhecido como ensaio da proveta e sua base química se assenta na técnica de extração líquido-líquido. Assim, neste método, a água da solução de NaCl atua na separação do álcool com relação aos hidrocarbonetos. O etanol apresenta uma parte polar e outra apolar: a porção apolar interage com os hidrocarbonetos, que também são apolares, por meio de ligações de dipolo induzido. Enquanto isso, a parte polar do etanol, identificada pelo grupo OH, é atraída pelas moléculas polares da água, formando ligações de hidrogênio que são mais fortes do que as interações dipolares induzidas. Isso permite a remoção dos hidrocarbonetos do álcool, que ficam localizados na parte de cima.

Os autores não realizaram o ensaio de acidez total e ponto de fulgor, contudo nessa resenha ele será abordado, visto que também são procedimentos para analisar a qualidade do etanol e que muitos laboratório credenciados pelo INMETRO realizam.

No caso da acidez total, consiste na medida da quantidade de ácido presente na amostra. Como citado anteriormente, uma amostra de etanol pode conter constituintes ácidos provenientes da produção, entre outros fatores. Assim, para averiguar essa característica é feita uma titulação do etanol com uma solução de hidróxido de sódio na presença de um indicador cujo ponto de viragem ocorre pela mudança da coloração a fim de determinar a acidez da amostra.<sup>29</sup>

Portanto, o teor de hidrocarboneto em etanol pode ser calculado a partir da tabela 2. É importante ressaltar que caso não haja uma extração significava na parte superior, ou seja, uma variação de volume expressiva, o teor de hidrocarboneto é reportado como não detectado (ND).

**Tabela 2.** Cálculo do teor de hidrocarbonetos.

Volume lido (mL)	Teor hidrocarbonetos
ND	ND
< 0,5	< 2
≥	(V X 2) + 1

O ensaio é regido pela norma NBR 9866<sup>30</sup>. A solução é feita de NaOH a fim de neutralizar o ácido presente. O preparo da solução de NaOH consiste em pesar 4 gramas de hidróxido de sódio, adicionar 100 mL de água deionizada a fim

ajudar a diluição, e depois completar o balão volumétrico de 1000 mL. Feito isso, o segundo passo é a padronização do NaOH visto que é um padrão secundário, ou seja, a sua concentração real é fortemente afetada pela umidade do ambiente, visto que ele é um padrão higroscópico. Dessa forma, o processo consiste em transferir 100 mL da solução mãe para um balão volumétrico de 500 mL e completar o volume com água, sempre homogeneizando. Para a padronização, pesa-se 100 mg de biftalato previamente seco em na estufa a 105°C, e depois adiciona-se 100 mL de água. Padroniza-se a solução de NaOH com a solução de biftalato de potássio, sendo que a concentração real é dada pela Equação 1. Em que C é a concentração real do NaOH, m é a massa do biftalato em mg, V é o volume gasto na titulação em mL.

$$C = m / V * 204,23 \quad \text{Equação 1}$$

Feito a padronização, inicia-se o ensaio, assim utiliza-se um frasco de erlenmeyer adicionado 50 mL de água denominada, acrescenta-se 4 gotas de uma solução de alfa-naftilamina, e titular até o ponto de viragem indicado pelo aparecimento da coloração azul, com um auxílio de uma pipeta volumétrica calibrada, adiciona-se 50 mL de etanol. Caso a solução permaneça azul, a amostra possui caráter alcalino. Caso ela fique incolor, a titulação é continuada até o reaparecimento da cor azul. Por fim, a determinação da acidez total é feita pela Equação 1.

$$AT = (C \times 60,05 \times 1000 \times \text{volume de etanol}) / \text{volume titulado}$$

#### Equação 2

Em que AT é acidez total, C é a concentração real de NaOH. No caso, o volume do etanol é 50 mL como previsto no procedimento do ensaio.

O volume titulado é o volume no ponto de equivalência, ou seja, o ponto em uma titulação em que o titulante e o analito estão presentes em quantidades estequiométricas, identificado por meio da mudança de coloração do indicador.

## Conclusões

O controle de qualidade de combustíveis é de suma importância para garantir a eficiência, segurança e conformidade ambiental dos produtos disponibilizados ao consumidor. Através de métodos e ensaios rigorosos é possível identificar e quantificar impurezas, contaminantes e adulterações nos combustíveis. Assim, esses procedimentos asseguram que os combustíveis atendam às especificações técnicas e regulamentações estabelecidas pela ANP.

O artigo em referência,<sup>16</sup> justamente como toda análise feita supracitada, mostrou que existem muitas não conformidades nos produtos vendidos no mercado e principalmente no caso do etanol, adulterações envolvendo o excesso de água no combustível, o que afeta a integridade do veículo. Em conclusão, o controle rigoroso de qualidade de combustíveis desempenha um papel fundamental na manutenção da integridade e desempenho dos sistemas de combustão, na proteção ambiental e na promoção da confiança e satisfação dos consumidores.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Linara Tarusa Damascena Correa

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Agradeço ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 F. A. Santos, J. H. D. Queiróz, J. L. Colodette, S. A. Fernandes, V. M. Guimarães and S. T. Rezende, Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol, *Quím. Nova*, 2012, **35**, 1004–1010.
- 2 H. S. Khesghi, R. C. Prince and G. Marland, THE POTENTIAL OF BIOMASS FUELS IN THE CONTEXT OF GLOBAL CLIMATE CHANGE: Focus on Transportation Fuels, *Annu. Rev. Energy. Environ.*, 2000, **25**, 199–244.
- 3 M. E. Himmel, S.-Y. Ding, D. K. Johnson, W. S. Adney, M. R. Nimlos, J. W. Brady and T. D. Foust, Biomass Recalcitrance: Engineering Plants and Enzymes for Biofuels Production, *Science*, 2007, **315**, 804–807.

- 4 M. Nitsch, O programa de biocombustíveis Proálcool no contexto da estratégia energética brasileira, Brazil. *J. Polit. Econ.*, 1991, **11**, 274–299.
- 5 E. T. D. Andrade, S. R. G. D. Carvalho and L. F. D. Souza, PROGRAMA DO PROÁLCOOL E O ETANOL NO BRASIL, *Engevista*.
- 6 CNPE passa a ter competência para fixar teor de etanol anidro na gasolina, <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-passa-a-ter-competencia-para-fixar-teor-de-etanol-anidro-na-gasolina>, (accessed 11 March 2024).
- 7 B. Digital, Etanol, <https://www.raizen.com.br/blog/etanol>, <https://www.raizen.com.br/blog/etanol>, (accessed 11 March 2024).
- 8 J. Belincanta, J. A. Alchorne and M. Teixeira Da Silva, THE BRAZILIAN EXPERIENCE WITH ETHANOL FUEL: ASPECTS OF PRODUCTION, USE, QUALITY AND DISTRIBUTION LOGISTICS, *Braz. J. Chem. Eng.*, 2016, **33**, 1091–1102.
- 9 GaussView, Version 6.1, Roy Dennington, Todd A. Keith, and John M. Millam, *Semichem Inc.*, Shawnee Mission, KS, 2016.
- 10 V. H. Cauduro, F. Fornasier, A. Teichmann and A. B. D. Costa, Determinação do teor de etanol anidro em gasolina por calibração multivariada utilizando espectroscopia no infravermelho médio, *Tecno-log.*, 2017, **21**, 125.
- 11 Ministério de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Resolução N° 1, percentual obrigatório de adição de etanol anidro combustível à gasolina, *Diário Oficial da União*, 2015.
- 12 Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP N° 907, especificações do etanol combustível e suas regras de comercialização em todo o território nacional, *Diário Oficial da União*, 2022.
- 13 V. S. Ponte Doctoral dissertation, Universidade Federal da Bahia, 2015.
- 14 A. R. O. Marchezan and M. Giesbrecht, Detecção de Adulteração do Etanol Hidratado utilizado nos Veículos de Ciclo Otto por Meio de Aprendizado de Máquina via Interface OBD, XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, 2021, 1500-1505.
- 15 E. C. M. Faria, Aline M. Silva, E. H. S. Cavalcanti, K. F. Ferreira and H. B. Napolitano, Qualidade de Combustíveis e as Novas Políticas Ambientais, *Rev. Proc. Q.*
- 16 D. D. A. Doretto, M. M. P. Sartori and W. G. Venturini Filho, ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO ETANOL HIDRATADO COMBUSTÍVEL NA CIDADE DE SÃO PAULO, *EnergAgric*, 2016, **31**, 356.
- 17 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resolução NBR 10891, Etanol hidratado combustível - Determinação do pH - Método potenciométrico, 2017.
- 18 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resolução NBR 10597, Determinação Da Condutividade Elétrica, 2016.
- 19 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resolução NBR 5992, Etanol combustível — Determinação da massa específica e do teor alcoólico por densímetro de vidro, 2016.
- 20 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resolução NBR 13993, Etanol combustível — Determinação do teor de hidrocarbonetos — Método volumétrico, 2018.
- 21 T. P. Vello, R. F. De Oliveira, G. O. Silva, D. H. S. De Camargo and C. C. B. Bufon, A simple capacitive method to evaluate ethanol fuel samples, *Sci Rep*, 2017, **7**, 43432.
- 22 C. R. Martins, W. A. Lopes and J. B. D. Andrade, Solubilidade das substâncias orgânicas, *Quím. Nova*, 2013, **36**, 1248–1255.

- 23 S. M. Traldi, I. Costa and J. L. Rossi, Corrosion of Spray Formed Al-Si-Cu Alloys in Ethanol Automobile Fuel, *KEM*, 2001, **189**, 352–357.
- 24 N. Jeuland, X. Montagne and X. Gautrot, Potentiality of Ethanol As a Fuel for Dedicated Engine, *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, 2004, **59**, 559–570.
- 25 F. C. Pereira, F. J. S. Lima and A. O. Da Silva, A Brief Review about some Aspects of Alcohol Vehicle Fuel and Quantitative Analysis of Chemical Species in this Energy Matrix, *Rev. Virtual Quim.*, 2016, **8**, 1702–1720.
- 26 Por que a overdose de álcool pode ser fatal, <https://veja.abril.com.br/saude/por-que-a-overdose-de-alcool-pode-ser-fatal/>, (accessed 21 March 2024).
- 27 J. O. Bockris, *Electroquímica moderna. Volumen 1*, Editorial Reverté, Barcelona, 2020.
- 28 R. C. O. B. Delgado, A. S. Araujo and V. J. Fernandes, Properties of Brazilian gasoline mixed with hydrated ethanol for flex-fuel technology, *Fuel Processing Technology*, 2007, **88**, 365–368.
- 29 M. A. Gonçalves, F. B. Gonzaga, I. C. S. Fraga, C. M. Ribeiro, S. P. Sobral, E. C. P. Rego, E. B. Santana, L. M. Oliveira, V. F. Silva, R. V. P. Leal, D. M. E. Santo Filho, J. R. R. Siqueira, T. P. Barbosa, J. M. Rodrigues, V. S. Cunha, V. L. Skrobot, C. B. Costa, A. R. Pessoa Júnior, H. S. P. Carneiro, H. Colares, E. Caliman and M. V. S. Alves, Avaliação de laboratórios brasileiros na determinação de alguns parâmetros de qualidade de biocombustíveis, *Quím. Nova*, 2013, **36**, 393–399.
- 30 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resolução NBR 9866, Etanol combustível — Determinação da acidez total por titulação colorimétrica, 2012.

# Identificação de Substâncias Proibidas: contribuição da Química no controle Antidoping de Enobosarm

DOI: 10.5281/zenodo.11089845

Júlia R. Vargas <sup>a\*</sup>

The article sought to investigate the use of UHPLC for the detection and quantification of ostarine, a selective androgen receptor modulator used to replace other anabolic steroids. The results presented demonstrate the possibility of using the UHPLC method for analysing biological samples and, therefore, it presents itself as a promising analytical method to be used in anti-doping surveillance.

O artigo buscou investigar o uso de UHPLC para detecção e quantificação de ostarina, um modulador seletivo de receptor andrógeno utilizado em substituição a outros anabolizantes esteroides. Os resultados apresentados demonstram possibilidade de uso do método de UHPLC para análise de amostras biológicas e, portanto, apresenta-se como um método analítico promissor a ser empregado na vigilância *antidoping*.

<sup>a</sup> Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB). Brasília, Distrito Federal, Brasil.  
\*E-mail: r.j.vaargas@gmail.com

**Palavras-chave:** Antidoping; Ostarine; MK2866; Enobosarm; UHPLC.

Aceito em 21 de março de 2024,  
Aprovado em 24 de abril de 2024,  
Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

**O ideal esportivo traz a crença de igualdade de oportunidades entre os atletas, que tem a dedicação, o talento e o esforço individual como fatores determinantes para a vitória. No entanto, com o avanço da ciência e da farmacologia, foram identificadas e sintetizadas muitas substâncias que atuam, direta ou indiretamente, sobre atributos físicos de interesse de atletas e, quando se há dúvida sobre a legitimidade das vitórias por uso de alguma dessas substâncias, essa confiança no mérito e na integridade dos atletas é ameaçada. O controle *antidoping* começou como uma forma de mitigar as preocupações sobre o uso de substâncias que poderiam, de alguma forma, interferir no desempenho de atletas e gerar vantagens injustas, ameaçando, portanto, a essência do esporte.<sup>1</sup>**

À medida que os casos de *doping* foram se tornando cada vez mais evidentes e ganhando cada vez mais notoriedade, surge um esforço mundial coordenado para garantir a integridade e igualdade em competições esportivas. A resolutiva desse esforço é a criação da Agência Mundial *Antidoping* ou Agência Mundial Antidopagem (WADA, em inglês, *World Anti-Doping Agency*) em 1999,<sup>1,2</sup> associada ao Comitê Olímpico Internacional (COI), que coordena e monitora os esforços *antidoping*, definindo padrões e diretrizes a serem aplicadas em competições esportivas ao redor do mundo.<sup>1</sup> Em 2003, foi introduzido o Código Mundial *Antidoping*,<sup>1,3</sup> de atualização anual, que compila as substâncias

proibidas em períodos de competição e a todo tempo, bem como define os métodos de detecção. No Brasil, esse Código é observado pela Autoridade Brasileira de Controle de Dopagem (ABCD) e pelo Ministério do Esporte (MESP).<sup>2</sup>

O Código traz duas grandes categorias, a saber: **a)** substâncias e métodos proibidos em todo tempo; ou seja, são proibidas em competição e fora de competição; e **b)** substâncias e métodos proibidos em competição, que começa às 23 h 59 min do dia anterior a uma competição em que o atleta deverá participar, mas há a possibilidade de determinação de períodos diferentes para determinado esporte. Importante ressaltar que o período de competição não se finaliza após a partida, mas sim ao final da competição, com a finalização do processo de coleta de amostras. As amostras, por sua vez, podem ser de sangue, cabelo ou urina (mais comum), coletadas na presença de um responsável do evento do mesmo sexo, a fim de evitar que haja algum tipo de fraude na coleta. Os atletas podem ser submetidos à testagem *antidoping* em qualquer momento da competição.<sup>4</sup> Caso seja constatado *doping*, a legislação internacional prevê sanções aplicáveis aos atletas pelos Estados e Federações Desportivas,<sup>1</sup> entretanto, essa discussão está fora do escopo do presente artigo.

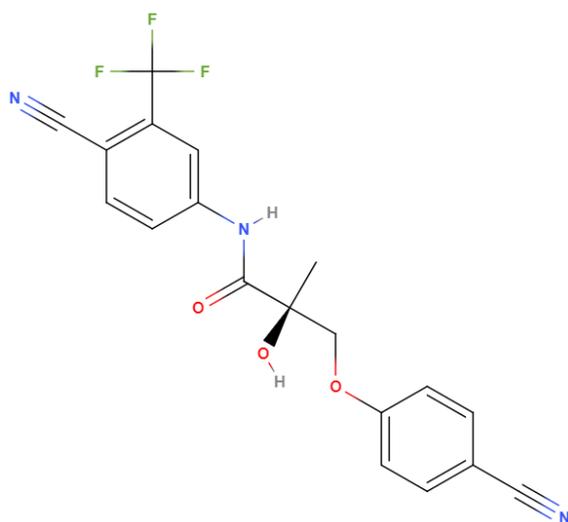
Nos últimos anos, diversos avanços têm sido feitos no movimento *antidoping*, e para citar alguns, tem-se o desenvolvimento de sensores eletroquímicos para corticosteróides,<sup>5</sup> biossensores para testosterona<sup>6</sup> e dexametasona,<sup>7</sup> sensores biomiméticos para detecção de

hidroclorotiazida<sup>8</sup>, substâncias previstas no Código Mundial *Antidoping*. Entretanto, com o aumento crescente das competições, nos mais diversos níveis, a fiscalização, por vezes, é insuficiente e pode incentivar atletas a utilizarem substâncias proibidas pela falta de análises e aplicações de sanções àqueles merecedores.<sup>9</sup>

No Brasil, um caso que ganhou bastante notoriedade nos últimos anos foi o da Oposta da Seleção Brasileira de Vôlei, Tandara Caixeta, condenada a quatro anos de suspensão pelo uso de Ostarina, uma substância proibida em todo o tempo, durante as Olimpíadas de Tóquio de 2020.<sup>10</sup>

A Ostarina (de fórmula molecular C<sub>19</sub>H<sub>14</sub>F<sub>3</sub>N<sub>3</sub>O<sub>3</sub>, também tratada com os nomes: ostarine, MK-2866, GTX-024 ou enobosarm) é um modulador seletivo de receptor andrógeno (SARM, em inglês: *selective androgen receptor modulator*)<sup>11,12</sup> que foi desenvolvido no intuito de prevenir e tratar perda de massa muscular, podendo ser utilizado na reposição de testosterona.<sup>13</sup> Ou seja, trata-se de um fármaco que se liga a receptores androgênicos de forma seletiva e sem estar associado aos efeitos colaterais comuns de outros anabolizantes esteroides (AAS, em inglês *anabolic and steroids*),<sup>11,14</sup> como acne, ginecomastia, crescimento da próstata<sup>14</sup> e outros, enquanto atua como agente seletivo e estimulante de cicatrização de lesões musculares. Pelas propriedades associadas à melhora de performance, a ostarina entrou para a lista de substâncias proibidas a todo o tempo em 2008.<sup>11</sup>

**Figura 1.** Estrutura molecular da Ostarina. Feita pela autora com uso do *software MolView*®.



Os SARM são uma classe relativamente nova de substâncias e apesar de alguns compostos já estarem no Código, alguns similares já podem ser encontrados no mercado. Contudo, é importante dizer que a ostarina e sua comercialização, no Brasil, é controlada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Dessa forma, trazendo novamente o caso da atleta Tandara Caixeta, que argumentou *doping* não intencional por contaminação cruzada a partir da farmácia de manipulação onde adquiria seus suplementos, o controle exercido pela Agência foi suficiente para que o Tribunal de Justiça Desportiva Antidopagem a suspendesse por quatro anos.<sup>10,15</sup> De qualquer forma, estudos têm sido desenvolvidos a fim de demonstrar que a ostarina pode ser transferida por fluidos corporais, como saliva, e pode ser responsável por *doping* não intencional.<sup>16</sup> Além disso, o método de coleta (urina, cabelo, sangue ou unhas, por exemplo) é importante para a determinação da janela de uso da substância, bem como a quantificação precisa é importante, uma vez que doses altas podem indicar uso contínuo ou uso recreacional, ambos entendidos como *doping* pela WADA atualmente.<sup>17</sup>

A ostarina é, hoje, o SARM mais relevante em esportes e, portanto, muitos estudos têm sido desenvolvidos para entender melhor seus efeitos no metabolismo e o comportamento de eliminação do composto.<sup>11</sup> É de interesse ímpar justamente por apresentar menos efeitos colaterais e uma meia vida de 24 h.<sup>12</sup> Esse composto se liga aos receptores andrógenos para a realização do anabolismo proteico em músculos e ossos. Atualmente, para identificação em SARM em testes *antidoping* são comumente empregadas as técnicas de cromatografia gasosa e líquida associadas à espectrometria de massas,<sup>18,19</sup> entretanto, outras técnicas têm passado por processo de estudo e validação, como o uso de SPE (em inglês: *solid-phase extraction*), que tem apresentado resultados promissores.<sup>11</sup> No estudo citado, foram testadas doses únicas de 1 µg, 10 µg e 50 µg e, apesar do tempo de meia vida da substância ser de 24 h, traços de ostarina foram identificados pela técnica em períodos de 72 a 120 h, 96 a 168 h e 120 a 216 h, respectivamente.

## Metodologia

A pesquisa que culminou no artigo referencial<sup>14</sup> buscou desenvolver um método preciso, sensível, rápido e de baixo custo para a determinação e quantificação de Ostarina em cápsulas por Cromatografia Líquida de Ultra Eficiência, mais comumente tratado como UHPLC (em inglês: *Ultra-High Performance Liquid Chromatography*), associado a UV. As

cápsulas de Ostarina foram adquiridas *on-line* de um *site* especializado em suplementos esportivos e a referência do composto foi adquirida de AbMole BioScience, uma empresa fornecedora de reagentes químicos.

Foi preparada uma solução estoque de 200 µg/mL de ostarina em metanol e, a partir dessa, foram preparadas soluções em 6 níveis de concentração diferentes entre 1 - 25 µg/mL a partir de diluições com 0,1% de ácido fórmico (1, 5, 10, 15, 20 e 25 µg/mL). As soluções a partir da ostarina padrão (adicionada de farinha de arroz e estearato de magnésio, para simular a lista de ingredientes fornecida pelo fabricante) foram preparadas no dia de análise em 5 níveis de concentração, a saber: 1, 10, 15, 20 e 25 µg/mL. As soluções passaram por processo de extração com metanol, diluídas com soluções 0,1% de ácido fórmico e filtradas com *nylon* de *mesh* 0,45 µm. Foram preparadas soluções placebo para comparação utilizando somente farinha de arroz e estearato de magnésio. Para o preparo das amostras partindo das cápsulas adquiridas, seus conteúdos foram homogeneizados e 51 mg do conteúdo foram pesados e sobre estes foram performados os processos de extração idênticos aos utilizados para as demais amostras de ostarina padrão.

Quanto ao equipamento, foi utilizado um Flexar-10 UHPLC (Perkin-Elmer) com amostrador automático, temperatura controlada e detector PDA UV-VIS. Todas as análises foram realizadas por cromatografia em fase reversa. A fase móvel era composta de metanol (75%) e 0,1% de ácido fórmico (25%) em regime de eluição isocrática com fluxo de 0,5 mL/min. O volume de injeção utilizado foi de 5 µL e a detecção feita em 270 nm. As soluções padrão de ostarina foram usadas na confecção da curva analítica.

## Resultados e discussão

A curva analítica gerada possuía coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9962$ . Esse coeficiente é amplamente utilizado nas ciências exatas, uma vez que é usado para avaliar o quão bem um modelo se ajusta aos dados experimentais. É a partir deste que se avalia a precisão (ou seja, repetibilidade das amostras e do método) e a exatidão. É muito usado em avaliações quimiométricas também. A acurácia e precisão obtida a partir dos 5 níveis de concentração das soluções preparadas com o padrão de ostarina demonstraram resultados interessantes que são apresentados, de forma simplificada, nas Tabelas 1 e 2. Torna-se importante dizer de antemão à apresentação das tabelas que “a partir das corridas” significa a

que “entre as corridas” significa a análise comparativa entre os cromatogramas obtidos para as várias corridas de amostras preparadas para terem as mesmas concentrações, para avaliar a variabilidade e sensibilidade do método em relação às diminutas diferenças entre as amostras.

**Tabela 1.** Resultados obtidos a partir das corridas. Adaptada da referência 14.<sup>14</sup>

Concentração Nominal (µg/mL)	Acurácia média (%)	Precisão (RSD, %)
1,39	108,97	1,92
10,03	99,14	1,24
14,93	101,72	0,82
19,93	93,04	1,55
25,02	104,34	1,07

**Tabela 2.** Resultados obtidos entre as corridas. Adaptada da referência 14.<sup>14</sup>

Concentração Nominal (µg/mL)	Acurácia média (%)	Precisão (RSD, %)
1,38	112,41	1,70
10,09	98,23	1,53
14,95	100,20	1,00
20,14	91,71	1,02
24,99	103,42	1,87

Em relação à extração do analito, a repetibilidade foi testada na concentração 20 µg/mL com cinco replicatas, obtendo rendimento de extração de 93,98% nas corridas, com Desvio Padrão Relativo entre as replicatas (RSD) de 1,72%. Entre corridas, o rendimento foi de 95,35% com RSD de 0,88%. Esses resultados indicam repetibilidade e precisão adequadas para análise do analito de estudo. O tempo de retenção é um dado importante quando realizando análises por cromatografia. Cada substância interage de forma diferente com as fases móvel e estacionária, levando uma quantidade de tempo específica (tempo de retenção) para ser detectada no detector. O método proposto pelos autores<sup>14</sup> se mostrou altamente seletivo para a ostarina (tempo de retenção de 1,7 min).

Apesar do método ter sido testado a partir do material sólido de cápsulas, a versatilidade do equipamento e o preparo de amostras utilizado pelos autores indica que há possibilidade de análise a partir de outros materiais aquosos, como urina ou

soluções preparadas a partir de amostras de sangue, podendo ser aplicado para investigação de *doping* intencional ou não intencional durante competições. É importante ressaltar também que UHPLC é um método rápido e foi notificado pelos autores que as corridas tiveram tempo médio de 2,5 min. Considerando a alta demanda de análises durante períodos de competição, a aplicação deste método pode ser de interesse dos laboratórios credenciados pela WADA.

A utilização do UHPLC também abre a possibilidade de uso de HPLC, uma técnica semelhante, mas muito mais comum em laboratórios de análise. A utilização de HPLC para esse tipo de avaliação precisaria passar pelo processo de validação analítica antes que seus resultados pudessem ser usados em processos *antidoping*, mas na ausência de UHPLC, é uma boa alternativa. Os dois métodos partem de princípios iguais, mas UHPLC oferece vantagens sobre o uso do HPLC tradicional (que continua sendo uma ótima técnica analítica, respeitadas as especificidades do método e do preparo adequado de amostras), como a melhor resolução e sensibilidade, menores tempos de análise e menor consumo de solventes, por exemplo.

## Conclusões

Em resumo, foi abordada a importância da Química no movimento *antidoping*, com enfoque nos estudos de detecção e quantificação de ostarina. O estudo referencial<sup>14</sup> demonstrou que a técnica de UHPLC é sensível para a detecção e quantificação, dentro de preceitos de precisão e acurácia esperados pela WADA, de ostarina, uma substância com uso crescente nos últimos anos por suas propriedades associadas à melhora de performance em atletas. O método proposto oferece uma abordagem confiável no monitoramento *antidoping*, tendo potencial de detecção não só da ostarina, mas de muitas outras substâncias proibidas.

## Contribuições por Autor

O artigo e a inclusão de algumas observações são de Júlia R. Vargas.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB/MEC, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 F. M. A. Aith, Regulação antidoping e saúde pública: limites à exposição humana ao risco sanitário e a glória desportiva, *Rev. Saúde Pública*, 2013, **47**, 1015–1018.
- 2 Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre-RS, Brazil, D. G. Vasques, F. P. Mariante Neto, N. M. N. Cardoso and M. P. Stigger, The independence of brazilian antidoping as to the ties between the State and sports federations, *J. Phys. Educ*, 2021, **32**, 1-10.
- 3 Agência Mundial Antidopping, Lista de Substâncias Proibidas, *Código Mundial Antidopagem*, 2024, <https://www.wada-ama.org/en/resources/world-anti-doping-code-and-international-standards/prohibited-list>.
- 4 COI, *Regras Antidoping Aplicáveis aos Jogos Olímpicos Rio 2016*, Rio de Janeiro, RJ, 2016, <https://www.cob.org.br/pt/documentos/download/444ff79060454/>.
- 5 Y. Xu, ELECTROCHEMICAL SENSOR FOR DOPING CORTICOSTEROIDS IN SPORTS, *Rev Bras Med Esporte*, 2023, **29**, 1-4.
- 6 Z. Ni, TESTOSTERONE BIOSENSOR IN SPORTS DOPING, *Rev Bras Med Esporte*, 2023, **29**, 1-4.
- 7 S. K. Purnama, R. I. Doewes, G. Elumalai, S. H. Azmi, I. Nuryadin, and Manshuralhudlari, BIOSENSOR DEVELOPMENT IN SPORTS DOPING WITH DEXAMETHASONE, *Rev Bras Med Esporte*, 2023, **29**, 1-4.
- 8 M. R. S. Ruy, E. C. Figueira and M. D. P. T. Sotomayor, Biomimetic sensor for detection of hydrochlorothiazide employing amperometric

- detection and chemometrics for application in doping in sports, *J Braz Chem Soc*, 2015, **26**, 2069–2076.
- 9 C. J. Brito, R. L. Mozer, E. M. A. De Bem, P. H. B. De Carvalho, A. C. C. Queiroz, F. Da IBello, L. B. M. Barreto and B. Miarka, Exploratory study on illegal pharmacologic agents in mixed martial arts performance, *Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano*, 2018, **20**, 269–279.
- 10 Tandara vê pena de quatro anos por doping “injusta e desproporcional”, <https://agenciabrasil.ebc.com.br/esportes/noticia/2022-05/tandara-ve-pena-de-quatro-anos-por-doping-injusta-e-desproporcional>, (accessed 24 March 2024).
- 11 K. Walpurgis, A. Rubio, F. Wagener, O. Krug, A. Knoop, C. Görgens, S. Guddat and M. Thevis, Elimination profiles of microdosed ostarine mimicking contaminated products ingestion, *Drug Test Anal*, 2020, **12**, 1570–1580.
- 12 A. Turza, A. Pop, M. Muresan-Pop, L. Zarbo and G. Borodi, Crystal and molecular structure of ostarine and andarine, *Journal of Molecular Structure*, 2020, **1199**, 1-11.
- 13 Primacêutica, Ficha técnica de substância (OSTARINA), São Paulo, SP, 2011.
- 14 A. Miklos, A. Tero-Vescan, L. Farczádi and D.-L. Muntean, Development and Validation of an UHPLC Method for Ostarine Determination in Dietary Supplements, *Acta Med Marisiensis*, 2019, **65**, 49–54.
- 15 Comitê não deve aceitar ‘uso acidental’ de ostarina por Tandara, diz médico, <https://www.cnnbrasil.com.br/esportes/comite-nao-deve-aceitar-uso-acidental-mesmo-que-tandara-prove-diz-medico/>, (accessed 24 March 2024).
- 16 J.-C. Alvarez, I. Etting and I. A. Larabi, Body fluid contamination in the context of an adverse analytical finding in doping: About a case involving ostarine, *Clinica Chimica Acta*, 2024, **557**, 1-6.
- 17 P. Kintz, The forensic response after an adverse analytical finding (doping) involving a selective androgen receptor modulator (SARM) in human athlete, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2022, **207**, 1-5.
- 18 V. Vasilev, N. Boaydjiev, T. Deneva, D. Arabadzhyska, M. Komrakova and K. Georgieva, Effects of Ostarine and Endurance Training on Some Functional, Hematological, and Biochemical Parameters in Male Rats, *Asian J Sports Med*, **15**, 1-10.
- 19 M. Thevis and W. Schänzer, Detection of SARMs in doping control analysis, *Mol Cell Endocrinol*, 2018, **464**, 34–45.

# MTBE como aditivo de alta octanagem na gasolina: riscos de contaminação de águas subterrâneas

DOI: 10.5281/zenodo.11089856

Eliardo da Silva Pinheiro Luz <sup>a\*</sup>

Gasoline, essential in modern society, has undergone constant innovations to improve its quality as a fuel. Tetraethyl lead was one of these additives, used to prevent the knocking effect in engines. However, its use posed serious environmental and human health risks, leading to its removal in 1977 in the USA. Oxygenated additives, such as MTBE, were adopted, but they resulted in aquifer contamination, mainly in the USA, leading to its discontinuation as an additive. Despite this, many countries still use this compound, and therefore, in these locations, it is necessary to investigate whether there is a danger of groundwater and aquifer contamination with MTBE and its derivatives, through the collection of groundwater samples and subsequent chemical analysis to detect such compounds.

A gasolina, essencial na sociedade moderna, passou por constantes inovações para melhorar sua qualidade como combustível. O tetraetil de chumbo foi um desses aditivos, utilizado para evitar o efeito de *knocking* nos motores.

Contudo, sua utilização acarretou sérios riscos ambientais e à saúde humana, levando à sua remoção em 1977 nos EUA. Aditivos oxigenados, como MTBE, foram adotados, porém, resultaram em contaminação de aquíferos, principalmente nos EUA, levando à sua descontinuação como aditivo. Apesar disso, muitos países ainda utilizam este composto e, portanto, nestes locais é necessário investigar se há perigo de contaminação de lençóis freáticos e aquíferos com MTBE e seus derivados, por meio da coleta de amostras de água subterrânea e subsequente análise química em busca de tais compostos.

<sup>a</sup> Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB). Brasília, Distrito Federal, Brasil.  
\*E-mail: eliardoluz@gmail.com

**Palavras-chave:** gasolina; MTBE; aditivo; contaminação; aquífero

Aceito em 23 de março de 2024,  
Aprovado em 25 de abril de 2024,  
Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

**A gasolina se firmou como um produto essencial para a sociedade moderna após a invenção e popularização dos automóveis com motor de combustão interna. Desde a concepção destes veículos, houve uma constante busca por inovações tecnológicas nesse setor e, entre elas, a melhoria da gasolina como combustível. Isto era feito através da pesquisa de compostos químicos que, ao serem adicionados à gasolina, seriam capazes de melhorar certas qualidades do combustível. Talvez o melhor exemplar destes aditivos seja o tetraetil chumbo ( $Pb(C_2H_5)_4$ ), que foi utilizado entre os anos 1920 e 1990 como maneira de evitar o efeito de *knocking* nos motores dos automóveis.<sup>1</sup>**

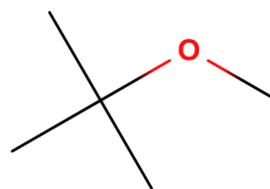
O chamado efeito *knocking* é causado quando compostos químicos presentes no combustível detonam irregularmente nos cilindros do motor durante o ciclo de compressão, podendo causar danos ao equipamento, desperdício de gasolina e um barulho característico de “*knock*”, que deu origem ao nome do efeito. Ao adicionar o tetraetil de chumbo à gasolina, aumenta-se sua resistência à compressão, evitando este efeito, característica chamada de índice de octanagem.<sup>2</sup>

Porém, antes mesmo da sua produção em escala industrial, a gasolina aditivada com chumbo sofria críticas por conta do risco que a liberação dos gases contendo o metal pesado apresentava para o meio ambiente e para a saúde

humana.<sup>1,2</sup> Apesar disso, o composto continuou sendo utilizado até que as preocupações com seu impacto na saúde tornaram-se grandes demais para ignorar, e, em 1977, o governo dos Estados Unidos promoveu sua total remoção da gasolina através do *Clean Air Act*, que previa a utilização de outros aditivos para o aumento da octanagem do combustível.<sup>1,3</sup>

Estes aditivos são chamados de oxigenados, pois contém pelo menos um átomo de oxigênio em sua composição, entre eles o etanol, o éter etil terc-butilico (ETBE) e o éter metil terc-butilico (MTBE), cuja estrutura está representada na figura 1. Ao longo dos anos 90, este último alcançou um crescimento elevado no seu uso como aditivo, chegando a atingir uma produção global de 19,4 milhões de toneladas em 1999.<sup>1,3</sup>

**Figura 1.** Estrutura do MTBE



Contudo, o que parecia ser uma adição que se tornaria o padrão para combustíveis tornou-se um novo problema. Ao longo da década de 90, foram reportadas inúmeras contaminações de aquíferos subterrâneos por MTBE em

regiões próximas a tanques subterrâneos de armazenamento de gasolina, sobretudo nos Estados Unidos, o seu maior consumidor na época. Esta possibilidade de afetar o abastecimento de água foi a raiz de uma série de discussões e painéis que culminaram com a descontinuação do uso do aditivo no país a partir de 2005.<sup>1</sup>

Este fato, porém, não significou a total substituição do composto como aditivo de octanagem, pois este continua sendo utilizado ainda principalmente em países em desenvolvimento, tendo a Índia e a China como maiores consumidores globais.<sup>4</sup> É importante, logo, que o perigo de contaminação representado pelo armazenamento de combustível contendo MTBE seja estudado e controlado nestes países. Este é o objetivo da pesquisa de Facetti *et al*<sup>5</sup>, que estudou como o MTBE e os produtos de sua degradação estavam presentes no aquífero Patiño, no Paraguai, e quais as áreas de risco envolvendo armazenamento de gasolina contendo o produto.<sup>5</sup>

## Metodologia

A pesquisa foi feita utilizando a Plataforma Elsevier, com as palavras chave “MTBE”, “Gasoline”, “Groundwater”, “Contamination”, sendo selecionados os artigos cuja publicação não ocorreu há mais de 5 anos.

Para a área que foi analisada para contaminação de MTBE e os subprodutos de sua degradação natural, através da ação de microrganismos<sup>6</sup>, álcool terc-butílico (TBA) e formiato de terc-butila (TBF)<sup>5, 6, 7</sup>. Os autores do artigo selecionaram uma área de 1770 km<sup>2</sup>, com as dimensões de 65 km por 30 km e uma profundidade aproximada de 600 metros, correspondente ao aquífero Patiño. Além disso, foi utilizada uma base de dados de nome *Geographical Information System* para coletar informações sobre o ambiente urbano sobre o aquífero, principalmente sobre tanques de armazenamento de gasolina e postos de combustível, ou seja, possíveis fontes de contaminação.

Para a amostragem, Facetti *et al*. buscaram com o serviço municipal dados sobre a posição de poços de abastecimento de água ao longo da cidade e, dentre eles, selecionaram aqueles em um raio de 900 metros de fontes de contaminação. Os 90 poços selecionados contam com bombas submersas e com estas foram coletadas amostras de água subterrânea, onde os autores mantiveram a bomba ligada até que a condutividade elétrica e temperatura da água corrente ficassem constante, momento no qual era coletado 40 mL de água. A coleta era feita em frascos pré-aquecidos e contendo

tiosulfato de sódio, responsável por remover resíduos de cloro da amostra.

A análise foi feita utilizando um cromatógrafo gasoso ligado a um aparelho de espectrometria de massa. A calibração do espectrômetro foi feita com MTBE, TBA e TBF, todos com uma pureza de 99,9%, obtendo-se curvas de calibração com coeficientes de correlação 0,9991-0,9925- 0,9992, respectivamente. As análises foram então coletadas e organizadas em concentrações de MTBE, TBA e TBF e distâncias de pontos de contaminação.

## Resultados e discussão

Dentre os 90 poços que tiveram amostras de água analisadas, 44% possuíam MTBE, 21% TBA e 13% TBF. No todo, 58% de todos os poços possuem quantidades detectáveis de MTBE e seus subprodutos, cujas concentrações estão descritas na tabela 1.

**Tabela 1.** Concentrações de MTBE, TBA e TBF encontradas nos poços de água em  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Extraído da referência 5.

Analito	Mínima	Máxima	Média
MTBE	0,010	0,156	0,033
TBA	0,030	0,230	0,111
TBF	0,018	0,055	0,029

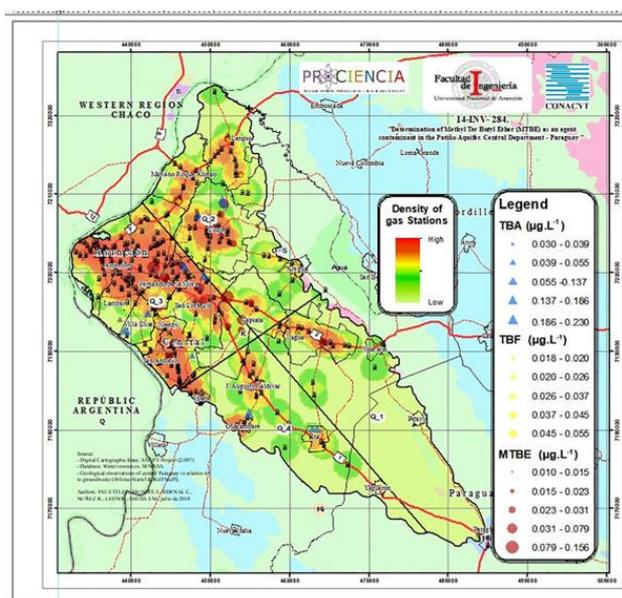
No caso dos poços que estavam próximos de tanques de armazenamento de gasolina, a porcentagem dos que estão contaminados com algum dos compostos sobe para 96%. De modo a verificar melhor a relação entre essas concentrações e as distâncias dos pontos de armazenamento encontradas, os autores utilizaram do método chamado *Principal Component Analysis*, uma ferramenta de análise de dados que permite verificar dentre um conjunto de variáveis correlacionadas quais dentre elas são componentes de outra e de quanto é essa influência, semelhante a uma combinação linear de valores.

Por este método, foi possível verificar algumas relações entre os dados obtidos: foi visto que os compostos TBF e TBA estão inversamente relacionados, ou seja, quanto maior a concentração de um menor a do outro. Também foi possível verificar que o MTBE está mais relacionado ao TBA que ao TBF, além de estar inversamente proporcional à

distância (do armazenamento de gasolina). Por fim, também é possível notar que o número de pontos de armazenamento é inverso à distância, ou seja, quanto maior o número de unidades em uma curta distância, maior as concentrações a serem encontradas.

Os autores<sup>5</sup> também montaram um mapa da área do aquífero Patiño, definindo os *hotspots* de contaminação com MTBE, disposto na figura 2. Dentre estes, os maiores estavam nos grandes centros urbanos, como a cidade de Assunção, sendo que apenas 3 poços estavam longe (mais de 4 km) de um tanque de armazenamento. Estes podem ser resultado de plumas de contaminação decorrentes do uso de gasolina como solvente para limpar partes de automóveis em oficinas artesanais na região, que contaminaram uma quantidade considerável de água. Ainda assim, 97% das amostras contaminadas estavam nas imediações de tanques subterrâneos nos grandes centros urbanos, onde se encontravam também as maiores concentrações de MTBE e subprodutos.

**Figura 2.** Mapa de *hotspots* no aquífero Patiño, extraído da referência 5.



## Conclusões

Tendo em vista os resultados apresentados, podemos concluir que as preocupações acerca do MTBE que surgiram ainda nos anos 90 tem fundamento, pois onde há um alto uso de combustível contendo esta substância como aditivo e pontos subterrâneos de armazenamento da mesma, o risco de

contaminação dos corpos de água subterrânea se torna consideravelmente elevado.

Visto o trabalho feito pelos autores, que tiveram o cuidado com a pesquisa da geologia, geografia e organização urbana do local de análise, além do cuidado com amostragem e o processo de análise química, é certo que estes resultados podem ser considerados confiáveis, o que é corroborado pela comparação de seus resultados com outros estudos com metodologia semelhante.

Apesar disto, os autores<sup>5</sup> não apresentaram uma explicação mais detalhada de como ocorre a degradação do MTBE no meio ambiente, através de bactérias que agem principalmente em condições aeróbicas<sup>7</sup>, o que poderia auxiliar no entendimento da distribuição dos subprodutos do mesmo no ambiente. O trabalho tem como principal objetivo dispor sobre a contaminação no local em foco, porém incluir mais dados e estudos sobre este ponto de vista poderia enriquecer o trabalho.

Portanto, estes estudos mostra que o método de armazenamento utilizado atualmente é incapaz de evitar este tipo de impacto ambiental, e em países que ainda utilizam o composto como componente da gasolina, seria ideal a busca por novas tecnologias para assegurar o total isolamento do combustível do meio ambiente, ou então a busca por outros aditivos que possuam uma capacidade menor de contaminação, como o etanol, que já é o principal aditivo para gasolina utilizado no Brasil e nos EUA.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Eliardo da Silva P. Luz.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 P. Harremoës and European Environment Agency, Eds., in *Late lessons from early warnings: the precautionary principle, 1896-2000*, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 2001.
- 2 D. Seyferth, The Rise and Fall of Tetraethyllead. 2., *Organometallics*, 2003, **22**, 5154–5178.
- 3 T. Lidderdale , *MTBE, Oxygenates, and Motor Gasoline*,  
<https://www.eia.gov/outlooks/steo/special/pdf/mtbe.pdf>.
- 4 Fact.MR – Methyl Tertiary-Butyl Ether (MTBE) Market Analysis, By Product Type (Oxygenate, Derivative Grade), By Application (Reformulated Gasoline, Solvents, Extraction), By End-use Industry (Oil & Gas, Polymers, Chemicals) - Global Market Insights 2022 to 2032, <https://www.factmr.com/report/521/methyl-tertiary-butyl-ether-market>, (accessed 23 March 2024).
- 5 J. F. Facetti, R. Nunez, C. Gomez L., J. Ojeda, C. Bernal, R. Leon-Ovelar and F. Carvallo, Methyl tert-butyl ether (MtBE) in deep wells of the Patiño Aquifer, Paraguay: A preliminary characterization, *Science of The Total Environment*, 2019, **647**, 1640–1650.
- 6 K. H. Kucharzyk, H. V. Rectanus, C. M. Bartling, S. Rosansky, A. Minard-Smith, L. A. Mullins and K. Neil, Use of omic tools to assess methyl tert-butyl ether (MTBE) degradation in groundwater, *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **378**, 120618.
- 7 M. Martienssen, H. Fabritius, S. Kukla, G. U. Balcke, E. Hasselwander and M. Schirmer, Determination of naturally occurring MTBE biodegradation by analysing metabolites and biodegradation by-products, *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, **87**, 37–53.

# O uso de adoçantes naturais na indústria de alimentos

DOI: 10.5281/zenodo.11089866

Vinícius Neibert Bezerra <sup>a\*</sup>

Throughout the review, the role of some of the main natural sweeteners as substitutes for sugar and artificial sweeteners in the food industry is discussed. To mention, the natural sweeteners honey, molasses, maple syrup, coconut sugar, agave syrup, date syrup, sorghum syrup and stevia are explored. Each compound is analysed for its properties and current uses to obtain a vision of the future of these substances in the food industry.

Ao longo da resenha, aborda-se o papel de alguns dos principais adoçantes naturais como substitutos ao açúcar e aos edulcorantes artificiais na indústria de alimentos. A citar, são explorados os adoçantes naturais mel, melaços, xarope de bordo, açúcar de coco, xarope de agave, xarope de tâmaras, xarope de sorgo e stevia. Cada composto é analisado quanto a suas propriedades e usos atuais para se obter uma visão de futuro dessas substâncias na indústria alimentícia.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: neibert.vinicius@gmail.com

**Palavras-chave:** Adoçantes naturais; Indústria de alimentos; Açúcar

Aceito em 22 de março de 2024,  
Aprovado em 25 de abril de 2024,  
Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

**A redução na ingestão de açúcares, principalmente o açúcar refinado e o cristal, é uma tendência mundial impulsionada pela relação de seu consumo a doenças cardiovasculares, aumento de peso corporal, obesidade, cáries dentárias, diabetes, hipertensão, entre outros. Nesse contexto, diversos adoçantes artificiais, também chamados de edulcorantes, ganharam força como uma alternativa ao açúcar, porém os efeitos causados pelo uso desses ainda se mantêm duvidosos. Nesse cenário de busca de outras alternativas, os adoçantes naturais demonstram ser uma solução a esse problema.<sup>1</sup>**

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), os açúcares livres são definidos como os monossacarídeos e dissacarídeos extraídos da cana de açúcar e outras fontes, além dos açúcares presentes naturalmente em mel, xaropes, sucos de frutas, entre outros. Como exemplos de açúcares têm-se a glicose, a frutose e a sacarose, que são amplamente empregadas em diversos alimentos processados, como bebidas, doces, bolos, bolachas, chocolates, cereais, pães, dentre outros. Dessa forma, a OMS indica uma ingestão máxima desses açúcares de 10% da energia total ingerida pelo indivíduo, o que em alguns países e localidades excessivamente dependentes dos açúcares pode ser extremamente difícil. Essa recomendação tem especial foco nos açúcares tradicionais, como o refinado e o cristal, que

devido ao processamento que passam, possuem uma maior capacidade de causar efeitos negativos ao corpo humano quando ingeridos em excesso.<sup>1</sup>

Nesse viés, diversos adoçantes artificiais estão presentes no mercado para serem alternativa ao açúcar tradicional, como o aspartame (com poder adoçante superior a 200 vezes ao açúcar), a sacarina, o ciclamato de sódio, a sucralose, entre outros. Esses produtos são edulcorantes de alta intensidade capazes de possuir zero calorias, fato este que é muito bem visto pelos consumidores, que se apresentam como produtos saudáveis e *diet*.<sup>2</sup>

Apesar das propriedades benéficas dos adoçantes artificiais, ainda há grande controvérsia em relação aos efeitos de seu uso nos seres humanos. Alguns estudos realizados em animais indicaram que o uso crônico desses aditivos alimentares estava relacionado a alterações na microbiota intestinal, ganho de peso corporal, desregulações da homeostase da glicose, induções a lesões renais, câncer e efeitos neurocomportamentais no animal.<sup>3</sup> Entretanto, a relação desses edulcorantes a esses problemas de saúde ainda é inconclusiva assim como a relação com efeitos benéficos ao indivíduo, visto que os dados clínicos e epidemiológicos apresentados ainda são inconsistentes, o que demonstra a necessidade de mais estudos com esses produtos para saber seus efeitos.<sup>4</sup>

Diante dessa realidade, a OMS emitiu em 2023 uma diretriz que sugere o não uso dos adoçantes sem açúcar como forma de controlar o peso corporal ou reduzir o risco de doenças não-transmissíveis, que se têm associadas à ingestão do açúcar tradicional. A diretriz emitida pela organização é resultado direto da insegurança em relação aos efeitos reais desses produtos, que podem de fato serem seguras ao consumo humano, porém, no momento, não são uma alternativa confiável ao consumidor como substituto do açúcar.<sup>5</sup>

Atualmente, há uma tendência por produtos mais naturais e um estilo de vida mais saudável. Diante desse cenário, os adoçantes naturais são vistos como uma excelente opção no mercado, sendo gradativamente mais utilizados pelas indústrias de alimentos e de bebidas como substituto ao açúcar e aos adoçantes artificiais. Esses aditivos alimentares naturais demonstram ser mais benéficos à saúde humana, apresentando efeitos que podem ser positivos ao consumidor, como a redução de glicose no sangue, melhora na saúde metabólica, não ganho de peso corporal devido ao seu consumo, baixo potencial glicêmico e composição rica em biomoléculas benéficas, como vitaminas, fitohormônios e minerais. É importante ressaltar que os adoçantes naturais geralmente são nutritivos, inclusive possuindo açúcares em sua composição, como o mel, o que demonstra que não devem ser utilizados de maneira irrestrita, podendo causar malefícios ao corpo humano quando ingeridos em excesso. Entretanto, o seu consumo acaba sendo mais saudável comparado ao açúcar tradicional por ser obtido por meios mais naturais, com menos processamentos que possam potencializar os malefícios observados para esses açúcares.<sup>6</sup>

Nesse contexto, o artigo de referência "*Natural sweeteners: Sources, extraction and current uses in foods and food industries*"<sup>7</sup> buscou fornecer uma visão geral a respeito dos principais adoçantes naturais, de forma a analisar suas propriedades, efeitos positivos e negativos no corpo humano, assim como as fontes de matéria-prima para cada um dos aditivos, seu processo de fabricação e o seu uso atual nas indústrias de alimentos e de bebidas. O artigo em questão explorou os seguintes edulcorantes naturais: mel, melaços, xarope de bordo, açúcar de coco, xarope de agave, xarope de tâmaras, stevia e xarope de sorgo. Além disso, apresentou mais superficialmente outras opções no mercado, como a fruta-dos-monges, o xarope yacon e o açúcar de palmeira.<sup>7</sup>

Ao longo da presente resenha, os adoçantes naturais mel, melaços, xarope de bordo, açúcar de coco, xarope de agave, xarope de tâmaras, xarope de sorgo e stevia serão explorados. Serão analisadas suas principais substâncias

químicas, propriedades, efeitos no corpo humano e usos na indústria de alimentos e de bebidas. Por fim, será desenvolvida uma análise desses aditivos alimentares como alternativa viável no mercado aos adoçantes artificiais e ao açúcar.

## Metodologia

A metodologia aplicada pelo texto de referência<sup>7</sup> foi uma extensa consulta na literatura por artigos relacionados ao tema dos adoçantes naturais. Após a devida identificação desses principais edulcorantes na indústria de alimentos, o artigo de revisão em questão coletou todas as informações relevantes de cada composto listado por meio dos artigos de referência. Por fim, com a literatura completa a respeito do tema, explorou cada substância e teceu sua análise a respeito dos adoçantes naturais como alternativa aos artificiais e aos açúcares tradicionais na indústria de alimentos.<sup>7</sup>

## Resultados e discussão

O mais conhecido adoçante natural é o mel, um líquido viscoso produzido pelas abelhas e armazenado em colmeias, sendo um alimento de fácil obtenção e processamento, além de apresentar uma grande capacidade de conservação devido à sua composição. O mel possui uma composição química variável, porém de maneira geral apresenta entre 12 a 23% de água, 60 a 85% de carboidratos e o resto composto de minerais, proteínas, vitaminas, enzimas, aminoácidos e ácidos orgânicos, além de substâncias bioativas como fenóis, flavonoides e outros compostos.<sup>8</sup>

O mel apresenta propriedade antimicrobiana e substâncias antioxidantes como catalase, ácidos orgânicos, carotenoides, glicose oxidase, ácido ascórbico, aminoácidos, proteínas, compostos fenólicos e melanoidinas. Além disso, é capaz de prevenir ou reduzir a taxa de deteriorização de alimentos por causa de sua função antioxidante. Devido à presença de compostos bioativos, em uma pesquisa recente foi indicado também que o mel tem capacidade de atuar como protetor a patologias que geram inflamações e danos no fígado.<sup>8</sup> Entre os principais usos na indústria de alimentos, observa-se a utilização desse líquido em cereais, em bebidas, na produção de cerveja e em produtos de padaria.<sup>7</sup>

Outros edulcorantes naturais a serem analisados são os melaços, que são um suco concentrado resultante como produto secundário do refinamento do açúcar e outras fontes. O melaço oriundo da cana de açúcar é obtido na etapa de centrifugação, sendo um derivado da sacarose nesse processo

de cristalização na forma de um xarope residual contendo os inibidores do processo de cristalização.<sup>9</sup> Tipicamente são compostos por 30 a 40% de sacarose, 17 a 25% de água, 4 a 9% de glicose e 5 a 12% de frutose, além de vitaminas e aminoácidos em menores quantidades.<sup>10</sup>

Há vários tipos de melaços, que variam de acordo com sua origem e seus constituintes, porém de maneira geral possuem como um dos seus usos mascarar sabores no produto. Ademais, tem utilização na indústria como agente colorante, em especial para alimentos assados, e possui propriedades antioxidantes, umectantes e coligativas, o que promove uma maior vida útil a esses alimentos. Por fim, devido ao processo de sua produção, o melaço retém substâncias de alto valor agregado, como compostos fenólicos, o que contribui para apresentar resistências a infecções e a atividades autoinflamatórias do corpo humano.<sup>11</sup> Dentre os seus atuais usos industriais, são muito utilizados em iogurtes e em processos fermentativos, como na fermentação para produção de pão.<sup>7</sup>

Outro substituinte ao açúcar tradicional é o xarope de bordo, obtido de árvores de bordo canadenses.<sup>12</sup> Esse composto possui propriedades antimutagênicas, antioxidantes e antiproliferativas do câncer.<sup>13</sup> Além disso, foi observado que extratos à base de acetato de etila deste adoçante apresentam propriedades anti-inflamatórias e efeitos no tratamento da doença Alzheimer.<sup>14</sup> Na indústria alimentícia, é utilizado em bebidas, em produtos de padaria e de confeitaria.<sup>7</sup>

Um adoçante natural comum é o açúcar de coco, obtido da seiva de palmeiras de coco. Este edulcorante é rico em vitaminas B1, B2, B3, B6 e C, possui cerca de 15% de sacarose em sua composição e um baixo índice glicêmico (35 a 42). A seiva da planta apresenta alto teor fenólico e grande poder antioxidante.<sup>7</sup> Este composto tem pouco uso na indústria no momento, tendo mais uso culinário e como adoçante de mesa.

Um edulcorante a ser analisado também é o xarope de agave, obtido do núcleo (*piña*) da planta de agave. Este adoçante é adquirido da hidrólise dos frutanos dessa *piña*. Quanto à sua composição, possui cerca de 95% de sólidos solúveis totais, dos quais 90% são concentrados de frutose. Devido à essa alta porcentagem em frutose, esse xarope apresenta índices glicêmicos inferiores a outros adoçantes (17 a 27), ainda sendo mais doce que outras alternativas, como o mel e o xarope de bordo.<sup>15</sup> Nesse sentido, tem-se uma menor ingestão calórica ao consumir esse edulcorante, o que é extremamente útil para prevenção de obesidade e diabetes.<sup>16</sup> Por fim, foi observado que este composto possui atuação contra

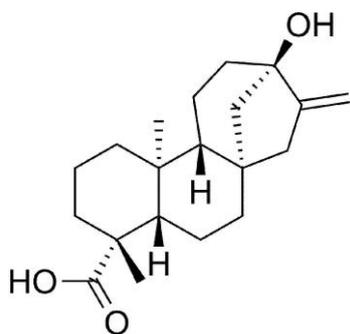
infecções entéricas, estimula resposta imune do corpo e apresenta propriedades prebióticas, que induzem crescimento de bactérias benéficas no cólon.<sup>17</sup> Atualmente, há uso na indústria de alimentos em produtos como barras de cereais, cookies e muffins, sendo visto como um adoçante muito promissor a outros produtos.<sup>7</sup>

Outro adoçante promissor é o xarope de tâmaras, que possui propriedades antioxidantes e baixo índice glicêmico. Essa substância é composta por carboidratos (70-80%), fibras dietéticas (8,7%), proteínas (1,8%), aminoácidos, vitaminas, sais e minerais.<sup>18</sup> O xarope de tâmaras se destaca pelos seus efeitos benéficos à saúde, pois possui vitaminas tiamina B1, ácido nicotínico, riboflavina B2, A e C. Além disso, estimulam a função imunológica do corpo humano e previnem cáries nos dentes devido à sua composição com selênio e flúor. Finalmente, é rico em ácidos graxos insaturados, como ácido linolênico, palmitoleico, linoleico e oleico, e outros 15 minerais, como cálcio, magnésio, ferro e potássio.<sup>19</sup> No momento, é utilizado como substituinte ao açúcar e adoçantes artificiais na indústria de iogurtes, sorvetes e produtos de padaria.<sup>7</sup>

Diferentemente de outros adoçantes naturais observados, o xarope de sorgo é obtido dos talos da planta de sorgo. Este edulcorante possui compostos fenólicos com propriedades terapêuticas, atuando na prevenção de obesidade, câncer, doenças cardiovasculares, entre outros. Outrossim, apresentam substâncias bioativas, como carotenoides, vitaminas e minerais em sua composição, porém atualmente seu principal uso é culinário.<sup>20</sup>

Finalmente, tem-se um dos principais adoçantes naturais na indústria de alimentos, a stevia, uma planta com usos farmacêuticos e medicinais com um sabor doce intenso. Esse sabor doce é causado pelos compostos glicosídeos de esteviol presentes, principalmente estevisídeo e rebaudiosídeo, que podem ser estruturados a partir da molécula do esteviol (Figura 1). Estes glicosídeos de esteviol possuem uma doçura 40 a 450 vezes maior que a sacarose.<sup>21</sup>

**Figura 1.** Estrutura química do esteviol



Os glicosídeos de esteviol se apresentam como excelentes substitutos à sacarose na indústria, tendo propriedades anti-inflamatórias, anticancerígenas, cardiotônicas, anti-hiperglicêmicas, anti-hipertensivas e antioxidantes, além de demonstrar efeito imunomodulador e atuação na prevenção de cáries. Ademais, este adoçantes naturais mantêm suas propriedades em elevadas temperaturas e não contêm calorias, sendo muito utilizado por pacientes diabéticos.<sup>21</sup> Na indústria, a stevia é um dos edulcorantes mais consolidados e utilizados, com utilizações em bebidas, sorvetes, temperos, iogurtes e produtos de padaria, assim como seu uso tradicional como adoçante de mesa.<sup>7</sup>

## Conclusões

Em síntese, observa-se que há diversas opções naturais para o açúcar e para os adoçantes artificiais na indústria de alimentos. O mel, os melaços, o xarope de bordo, o açúcar de coco, o xarope de agave, o xarope de tâmaras, o xarope de sorgo e a stevia são apenas alguns dos edulcorantes a serem analisados e utilizados. Além desses compostos explorados, é possível citar também o eritrol, a taumatina, o xilitol, a fruta-dos-monges, o xarope yacon e o açúcar de palmeira, que possuem grande importância na indústria alimentícia.

Nessa perspectiva, a substituição ao açúcar tradicional é uma tendência mundial em ascensão e em meio às inconsistências e inseguranças a respeito dos adoçantes artificiais, os edulcorantes naturais têm futuro promissor nos alimentos. Nesse viés, conclui-se que, embora essas substâncias atualmente possuam usos limitados na indústria, apresentam diversas propriedades benéficas ao corpo humano e grande potencial para essa substituição nos produtos, o que sugere a necessidade de maiores investimentos e estudos a respeito desses compostos.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Vinícius Neibert Bezerra.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 WHO guideline, <https://www.who.int/news/item/04-03-2015-who-calls-on-countries-to-reduce-sugars-intake-among-adults-and-children>, (accessed 17 March 2024).
- 2 Adoçantes naturais e artificiais, <https://www.einstein.br/noticias/noticia/adoçantes-naturais-artificiais>, (accessed 17 March 2024).
- 3 V. Ebrahimzadeh Attari, M. R. Ardalan, A. Malek Mahdavi and A. Gorbani, A review of the health hazards of artificial sweeteners: are they safe?, *Progress in Nutrition*, 2018, **20**, 36–43.
- 4 S. Lohner, I. Toews and J. J. Meerpohl, Health outcomes of non-nutritive sweeteners: analysis of the research landscape, *Nutr J*, 2017, **16**, 55.
- 5 WHO advises not to use non-sugar sweeteners for weight control in newly released guideline, <https://www.who.int/news/item/15-05-2023-who-advises-not-to-use-non-sugar-sweeteners-for-weight-control-in-newly-released-guideline>, (accessed 17 March 2024).
- 6 C. H. Edwards, M. Rossi, C. P. Corpe, P. J. Butterworth and P. R. Ellis, The role of sugars and sweeteners in food, diet and health: Alternatives for the future, *Trends in Food Science & Technology*, 2016, **56**, 158–166.

- 7 R. Castro-Muñoz, M. Correa-Delgado, R. Córdova-Almeida, D. Lara-Nava, M. Chávez-Muñoz, V. F. Velásquez-Chávez, C. E. Hernández-Torres, E. Gontarek-Castro and M. Z. Ahmad, Natural sweeteners: Sources, extraction and current uses in foods and food industries, *Food Chemistry*, 2022, **370**, 130991.
- 8 A. A. Machado De-Melo, L. B. D. Almeida-Muradian, M. T. Sancho and A. Pascual-Maté, Composition and properties of *Apis mellifera* honey: A review, *Journal of Apicultural Research*, 2018, **57**, 5–37.
- 9 A. Palmonari, D. Cavallini, C. J. Sniffen, L. Fernandes, P. Holder, L. Fagioli, I. Fusaro, G. Biagi, A. Formigoni and L. Mammi, Short communication: Characterization of molasses chemical composition, *Journal of Dairy Science*, 2020, **103**, 6244–6249.
- 10 A. L. Mordenti, E. Giaretta, L. Campidonico, P. Parazza and A. Formigoni, A Review Regarding the Use of Molasses in Animal Nutrition, *Animals*, 2021, **11**, 115.
- 11 M. Chen, H. Meng, Y. Zhao, F. Chen and S. Yu, Antioxidant and in vitro anticancer activities of phenolics isolated from sugar beet molasses, *BMC Complement Altern Med*, 2015, **15**, 313.
- 12 E. J. Garcia, T. McDowell, C. Ketola, M. Jennings, J. D. Miller and J. B. Renaud, Metabolomics reveals chemical changes in *Acer saccharum* sap over a maple syrup production season, *PLoS ONE*, 2020, **15**, e0235787.
- 13 M. Brochu, C.-P. Lafrance, E. Landry and M. Maheux, Isolation and characterization of major polysaccharides from maple sugar, *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2019, **17**, 100174.
- 14 C. L. Hawco, Y. Wang, M. Taylor and D. F. Weaver, A Maple Syrup Extract Prevents  $\beta$ -Amyloid Aggregation, *Can. J. Neurol. Sci.*, 2016, **43**, 198–201.
- 15 M. Barajas Ja, M. Ortiz E and S. Aguirre Cr, Quick Method for Determination of Fructose-Glucose Ratio in Agave Syrup, *J Food Process Technol*, , DOI:10.4172/2157-7110.1000710.
- 16 C. Ozuna, E. Trueba-Vázquez, G. Moraga, E. Llorca and I. Hernando, Agave Syrup as an Alternative to Sucrose in Muffins: Impacts on Rheological, Microstructural, Physical, and Sensorial Properties, *Foods*, 2020, **9**, 895.
- 17 E. Catry, L. B. Bindels, A. Tailleux, S. Lestavel, A. M. Neyrinck, J.-F. Goossens, I. Lobysheva, H. Plovier, A. Essaghir, J.-B. Demoulin, C. Bouzin, B. D. Pachikian, P. D. Cani, B. Staels, C. Dessy and N. M. Delzenne, Targeting the gut microbiota with inulin-type fructans: preclinical demonstration of a novel approach in the management of endothelial dysfunction, *Gut*, 2018, **67**, 271–283.
- 18 S. Ghnimi, S. Umer, A. Karim and A. Kamal-Eldin, Date fruit (*Phoenix dactylifera* L.): An underutilized food seeking industrial valorization, *NFS Journal*, 2017, **6**, 1–10.
- 19 S. A. Ibrahim, A. A. Ayad, L. L. Williams, R. D. Ayivi, R. Gyawali, A. Krastanov and S. O. Aljaloud, Date fruit: a review of the chemical and nutritional compounds, functional effects and food application in nutrition bars for athletes, *Int J of Food Sci Tech*, 2021, **56**, 1503–1513.
- 20 L. De Morais Cardoso, S. S. Pinheiro, H. S. D. Martino and H. M. Pinheiro-Sant'Ana, Sorghum (*Sorghum bicolor* L.): Nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, **57**, 372–390.
- 21 D. P. Singh, M. Kumari, H. G. Prakash, G. P. Rao and S. Solomon, Phytochemical and Pharmacological Importance of Stevia: A Calorie-Free Natural Sweetener, *Sugar Tech*, 2019, **21**, 227–234.

# PRODUÇÃO DE REFRIGERANTES NO BRASIL

DOI: 10.5281/zenodo.11092370

Pedro Paulo Marques<sup>a\*</sup>

The soft drink industry in Brazil, from its inception in 1904 to its current status as the third-largest global producer, reflects the country's economic, technological evolution, and cultural heritage. Iconic flavors like guarana, introduced in 1905, and the success of Guaraná Champagne Antarctica in 1921 mark significant milestones. Consumption surged with the advent of domestic refrigeration in the 1950s, especially with the adoption of PET packaging. Basic ingredients include water, sugar, fruit concentrates, and carbon dioxide. The manufacturing process, regulated and meticulous, spans from syrup preparation to bottling and labeling. This adaptable industry continues to meet market demands, offering diverse flavors while maintaining high-quality standards.

A indústria de refrigerantes no Brasil, desde suas origens em 1904 com a fundação da primeira fábrica, até sua atual posição como o terceiro maior produtor mundial, reflete não apenas a evolução econômica e tecnológica do país, mas também suas tradições culturais. O sabor emblemático do guaraná, originado em 1905, e o sucesso do Guaraná Champagne Antarctica em 1921 são marcos nessa jornada. O consumo de refrigerantes disparou após a introdução dos refrigeradores domésticos nos anos 1950, especialmente com a adoção do PET como embalagem. A composição básica inclui água, açúcar, concentrados de frutas e dióxido de carbono. O processo de fabricação, meticuloso e regulamentado, passa por diversas etapas, desde a preparação do xarope até o envase e rotulagem. Essa indústria, marcada por sua complexidade e inovação, continua a se adaptar às demandas do mercado, oferecendo uma ampla gama de sabores e mantendo altos padrões de qualidade.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília - UnB. Campus Darcy Ribeiro - Instituto de Química

\*E-mail: [ppmarques01@gmail.com](mailto:ppmarques01@gmail.com)

**Palavras-chave:** refrigerantes; produção; equipamentos; xarope; indústria.

Aceito em 22 de março de 2024,

Aprovado em 25 de abril de 2024,

Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

A história do ramo de bebidas gaseificadas no Brasil remonta a 1904, quando foi estabelecida a primeira fábrica do setor. Ao longo dos anos até a década de 1930, surgiram mais cinco indústrias. Estas empresas, em sua maioria familiares, continuam em operação até os dias atuais, mantendo uma forte identidade regional. Naquela época, a produção era manual, limitada a cerca de 150 garrafas por hora ou menos. Um dos sabores mais icônicos é o guaraná, cuja produção começou em 1905, com a criação do xarope da fruta proveniente da região de Maués, no Amazonas. Em 1921, um químico desenvolveu a fórmula do Guaraná Champagne Antarctica, lançado pela Companhia Antarctica Paulista, tornando-se um sucesso de vendas. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e de Bebidas Não Alcoólicas (ABIR), os refrescos básicos contêm gás carbônico, são não alcoólicos e adoçados. Este grupo inclui bebidas destinadas ao consumo doméstico ou em estabelecimentos comerciais. Já as bebidas com sabor e baixa gaseificação podem ser encontradas em máquinas de bebidas carbonatadas, excluindo os chás e energéticos. A introdução dos refrigeradores domésticos nos anos 1950 impulsionou

significativamente o consumo de refrigerantes no país. Esse aumento foi ainda mais notável com a adoção do Politereftalato de Etileno (PET) como alternativa de embalagem ao vidro. O Brasil é o terceiro maior produtor de refrescos do mundo, com um consumo médio de 69 litros por pessoa anualmente. Entre 1988 e 2004, o mercado interno cresceu 165%, elevando a participação dos refrescos regionais de 9% para 32%. Estimativas da ABIR apontavam um consumo de 15.645 milhões de litros de refrigerantes em 2011, empregando aproximadamente 300 mil pessoas no setor.<sup>1</sup>

O parágrafo 45 do Decreto número 2.314 de 1997 define refrigerante como uma "bebida gaseificada, obtida pela dissolução, em água potável, de suco ou extrato vegetal de sua origem, adicionada de açúcares".<sup>2</sup>

A história cativante do ramo de bebidas gaseificadas no Brasil não apenas reflete a evolução tecnológica e econômica do país, mas também espelha suas tradições profundamente enraizadas, as quais se manifestam nos sabores e costumes locais. Desde os primeiros empreendimentos artesanais até as modernas fábricas, as bebidas gaseificadas tornaram-se uma parte intrínseca da cultura brasileira,

marcando momentos de celebração e união ao longo das décadas.

Neste contexto, este estudo busca não apenas aprofundar na composição química das bebidas gaseificadas, mas também compreender os processos industriais envolvidos em sua fabricação. Ao investigar minuciosamente cada etapa do processo, desde a seleção dos ingredientes até a embalagem final do produto, busca-se elucidar os componentes fundamentais que conferem sabor e características sensoriais às bebidas gaseificadas, bem como compreender as exigências técnicas e regulatórias que permeiam essa indústria.

## Metodologia

A análise metodológica do artigo de referência foi direcionada para estudos que exploraram diferentes aspectos da fabricação de bebidas gaseificadas, como matéria-prima, operações e equipamentos utilizados. Foram considerados os trabalhos de G. F. B. Cruz e outros, de acordo com sua relevância para as aplicações específicas mencionadas no artigo.

## Resultados e discussão

Os ingredientes primários utilizados na fabricação de bebidas gaseificadas incluem água, açúcar, concentrados (como extratos, óleos essenciais e destilados de frutas ou vegetais) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ).<sup>3</sup>

Entende-se como bebida qualquer produto industrializado, em forma líquida, destinado ao consumo humano, excluindo-se aqueles com propósitos medicinais. As bebidas derivam de frutas frescas e maduras, ou partes selecionadas de vegetais, sem serem concentradas, fermentadas ou diluídas por processos tecnológicos. Logo, as bebidas gaseificadas são obtidas pela dissolução de suco ou extrato vegetal, acrescidas de açúcares.<sup>1</sup>

A composição básica das bebidas gaseificadas consiste em água, que representa 88% do volume final, açúcar em uma proporção de 8-12% do volume final, e outros aditivos, que correspondem a 1-2% do volume final.<sup>4</sup>

As variações nos tipos e quantidades de aditivos utilizados para conferir sabor, aroma e coloração às bebidas gaseificadas são adaptadas conforme as particularidades de cada tipo de bebida a ser produzida. Da mesma forma, a quantidade de açúcar adicionada é ajustada de acordo com o grau de doçura desejado, conforme as preferências do

fabricante. Para os refrescos com sabor de cola, são necessários ingredientes como açúcar, extrato de cola, aroma de cola, ácido cítrico, sorbato de potássio, ácido fosfórico, corante de caramelo tipo IV (cola) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Enquanto isso, para os refrescos de guaraná, os ingredientes iniciais podem incluir açúcar, extrato de guaraná, aroma de guaraná, ácido cítrico, sorbato de potássio, corante de caramelo tipo IV (guaraná) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ).<sup>5</sup>

### Água

Este constitui o componente predominante na composição das bebidas gaseificadas, representando até cerca de 90% do volume total. Conforme estabelecido pelo Artigo 15 do Decreto número 2.314 de 1997, a água empregada na produção de bebidas gaseificadas deve atender a critérios específicos, sendo necessário que seja limpa, inodora, incolor, não contenha germes patogênicos e observe o padrão de potabilidade.<sup>3</sup>

### Açúcar

Os açúcares mais importantes do ponto de vista fisiológico e comumente utilizados na produção de alimentos incluem os monossacarídeos (glicose, galactose e frutose), bem como os dissacarídeos (lactose, sacarose e maltose).<sup>6</sup>

O setor de produção de bebidas gaseificadas é um dos maiores consumidores de açúcar, sendo considerado o principal consumidor no mercado brasileiro. Na fabricação de bebidas gaseificadas, o açúcar mais utilizado geralmente é apresentado na forma líquida, conhecido como xarope de sacarose, com concentrações pré-determinadas para facilitar sua utilização no processo de produção.<sup>4</sup>

Nos refrescos clássicos, que contêm calorias, o açúcar é o único adoçante utilizado. Por contraste, os refrescos rotulados como de baixa caloria são adoçados com edulcorantes, tais como sacarina, aspartame ou estévia, como exemplos. Conforme estabelecido no parágrafo sete do Artigo 45 do Decreto número 2.314 de 1997, não é permitida a utilização simultânea de açúcares e edulcorantes de baixa caloria na formulação de um mesmo refrigerante.<sup>3</sup>

### Concentrados

Os diversos tipos de concentrados, sejam derivados de sucos de frutas, destilados de frutas/vegetais ou óleos essenciais, possuem quantidades mínimas estabelecidas por lei para a fabricação de bebidas gaseificadas. Os sucos de frutas

concentrados são mais amplamente utilizados devido à sua boa conservação, facilidade de transporte e armazenamento, além de garantirem uma maior durabilidade do aroma em comparação com os sucos convencionais.<sup>3</sup>

De acordo com as diretrizes do quarto parágrafo do Artigo 45 do Decreto número 2.314 de 1997, os refrigerantes sabor guaraná são requeridos por lei a incluir dois centésimos de grama de semente de guaraná (pertencente ao gênero Paullinia), ou uma medida correspondente de extrato, em cada cem mililitros da bebida. Este mínimo é uma exigência legal.<sup>3</sup>

**Figura 1.** Planta do guaraná. Extraído de <https://www.manejem.com.br/publicacao/novidades/a-cultura-do-guarana-parte-2>



Segundo o que é especificado no quinto parágrafo do Artigo 45 do Decreto número 2.314 de 1997, o refrigerante com sabor de cola é mandado por lei a incluir a semente de noz de cola ou extrato correspondente.<sup>3</sup>

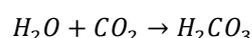
**Figura 2.** Semente de noz de cola. Extraído de <https://www.mundoboaforma.com.br/noz-de-cola-o-que-e-para-que-serve-e-beneficios/>



### Gás carbônico

De acordo com o que está mencionado no início do Artigo 45 do Decreto 2.314 de 1997, é imprescindível que o refrigerante contenha obrigatoriamente dióxido de carbono de grau industrial em sua saturação.<sup>2</sup>

Esse é o componente distintivo das bebidas gaseificadas, responsável pela sua aparência e pelo realce do sabor. Além disso, induz à carbonatação na base da mistura das bebidas, proporcionando uma sensação sensorial de efervescência, conforme esperado pelo consumidor no produto final. O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é incolor e possui um odor que pode causar leve irritação quando inalado, devido à sua ligeira picância. Quando adicionado à água, produz um sabor ácido devido à formação de ácido carbônico, como demonstrado na equação abaixo:<sup>3</sup>



O papel essencial do dióxido de carbono na definição de várias características do produto final, incluindo o aprimoramento do sabor e a criação de uma sensação refrescante, destaca-se. Assim, a quantidade utilizada desempenha um papel crucial na qualidade geral das bebidas carbonatadas. No entanto, diferentes volumes adicionados às bebidas podem afetar tanto o aroma quanto o sabor delas.<sup>3</sup>

### Conservantes

Utilizados para a finalidade de atrasar a deterioração causada por micro-organismos, como leveduras, fungos e bactérias, que porventura estejam presentes no produto e possam afetar sua qualidade final. Entre os conservantes mais comuns estão o ácido benzoico e o ácido sórbico, bem como seus sais de sódio, cálcio e potássio correspondentes.<sup>3</sup>

### Acidulantes

Os agentes acidulantes têm um papel crucial nas bebidas carbonatadas, controlando o nível de doçura do açúcar, realçando o sabor e reduzindo o pH para prevenir a proliferação de microrganismos. O ácido cítrico (INS 330) é o agente acidulante mais prevalente em bebidas energéticas, reconhecido por suas características de sabor, capacidade de regular o pH e manter a efervescência, além de prolongar a estabilidade da vitamina C. Com cerca de 70% da sua produção mundial destinada à indústria alimentícia, sua alta solubilidade o torna particularmente adequado para uso em xaropes concentrados, devido à sua aceitação pelo paladar, segurança e fácil absorção pelo organismo humano.<sup>10</sup>

## Antioxidantes

Para evitar a rápida deterioração do produto devido à presença de oxigênio, são utilizados antioxidantes para neutralizar sua ação. A exposição inadequada ao sol pode acelerar o processo de oxidação na bebida, já que a luz e o calor intensificam essa reação. Entre os antioxidantes mais frequentes encontrados nas bebidas carbonatadas estão o ácido ascórbico (vitamina C) e o isoascórbico.<sup>3</sup>

## Aromatizantes

Tanto os aromatizantes quanto os flavorizantes desempenham um papel significativo na criação ou realce do aroma das bebidas, porém, estes últimos vão além, contribuindo também para o sabor. Esses aditivos têm características notáveis, pois são capazes de criar novos sabores não encontrados na natureza ou até mesmo substituir e disfarçar sabores já presentes quando combinados com os alimentos. Em linhas gerais, os aromas usados na produção de bebidas carbonatadas são obtidos a partir de essências ou extratos alcoólicos, soluções aquosas ou emulsões, soluções aromáticas em glicerol ou propilenoglicol, e até mesmo sucos concentrados de frutas. Enquanto isso, sucos, extratos, emulsões, aromas naturais e óleos essenciais são utilizados como aromatizantes e flavorizantes.<sup>3</sup>

## Corantes

O colorante, como o próprio termo indica, é utilizado para dar cor ou realçar a tonalidade da bebida. Podem ser empregados em diferentes formas, tanto de origem natural quanto artificial. Alguns dos mais comuns, como o  $\beta$ -caroteno e as antocianinas, são naturais, enquanto outros, como o amarelo tartrazina, amarelo crepúsculo, amaranço (bordeaux) e azul brilhante, são artificiais.<sup>3</sup>

A fabricação de bebidas é categorizada como uma indústria de transformação devido à sua diversidade de processos, que envolvem procedimentos químicos essenciais para alcançar o produto final. Assim, a produção pode ser conduzida tanto de forma contínua quanto em lotes, e essa escolha é influenciada pela demanda de produção, o nível de tecnologia disponível e as instalações físicas da fábrica. Optando pelo processo em lotes, os ciclos de produção são mais curtos. Por outro lado, na opção pelo processo contínuo, a produção continua sem interrupções significativas, ou com apenas pequenas pausas que não comprometem as características do processo.<sup>7</sup>

O quadro a seguir apresenta as principais características dos dois processos, destacando suas diferenças para ilustração:

**Tabela 1.** Diferenças entre processo contínuo e por batelada. Extraído da referência 7.

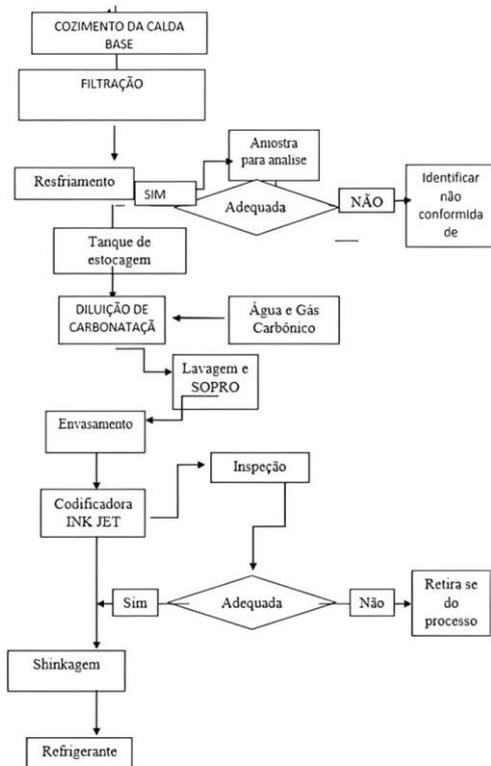
Processo contínuo	Processo por batelada
Alta velocidade de produção, pouco trabalho humano	Tempo de lead time grande, muito trabalho humano no processo
Clara determinação de capacidade, uma rotina para todos os produtos, baixa flexibilidade	Capacidade não facilmente determinada (diferentes configurações, rotinas complexas)
Baixa complexidade do produto	Produtos mais complexos
Baixo valor agregado	Alto valor agregado
Tempos de parada causam grande impacto	Tempos de parada causam menor impacto
Pequeno número de etapas de produção	Grande número de etapas de produção
Número limitado de produtos (ou seja, grande demanda para poucos tipos)	Maior variedade de produtos (baixa demanda de variados tipos)

O processo essencial para a fabricação de bebidas carbonatadas começa com a preparação do xarope composto. No entanto, para obter esse composto, é necessário primeiro preparar o xarope simples, que consiste em dissolver açúcar em água quente tratada (livre de micro-organismos patogênicos). Após essa fase, são adicionados ao xarope simples conservantes, agentes acidulantes e aromatizantes, os quais, quando combinados, conferem o sabor característico à bebida, resultando no xarope composto. Esse xarope composto é então misturado com água já carbonatada para, por fim, se transformar na bebida gaseificada.<sup>1</sup>

O diagrama a seguir ilustra de maneira simples e concisa todas as fases do processo de fabricação dos refrigerantes:

**Figura 3.** – Fluxograma do processo de produção de refrigerante. Extraído da referência 1.

FLUXOGRAMA DO REFRIGERANTE.



Adentrando na descrição das operações conduzidas ao longo da linha de produção e dos equipamentos envolvidos, temos as descrições a seguir, enumeradas de 1 a 12, feitas a partir da referência 8.

1 - Captação de água: geralmente, a água é adquirida de poços, já que essa fonte é conhecida por sua qualidade reconhecida;<sup>8</sup>

2 - Filtração: para garantir a qualidade da água utilizada na produção, ela passa por um processo de filtragem em super filtros que possuem microporos. Estes poros têm um diâmetro de 5 micras, onde 1 micra equivale a uma divisão de 1 milímetro em mil partes. Esses filtros têm a função de capturar as impurezas presentes na água;<sup>8</sup>

3 - Xaroparia: é a área destinada à preparação do xarope, por vezes chamada de laboratório. Normalmente, é onde ocorre a mistura do açúcar com outros aditivos, como aromas, extratos e ácido cítrico, junto com a água. A proporção ilustrada é de uma parte de xarope para cinco partes de água;<sup>8</sup>

4 - Laboratório de controle de qualidade: trata-se do local designado para a análise das amostras dos produtos, recolhidas diariamente, para garantir a conformidade com os padrões de qualidade e regulamentos estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores;<sup>8</sup>

5 - Sopradora: o material básico usado para as embalagens, conhecido como Politereftalato de Etileno (PET), chega à fábrica em um tamanho padrão que não coincide com a forma desejada para conter o refrigerante. Para transformá-lo em garrafas, o PET é submetido a um processo de sopro, onde é aquecido para se tornar maleável e, em seguida, moldado na forma desejada. Depois, o material moldado é resfriado para endurecer e se transformar na embalagem final;<sup>8</sup>

6 - Linha de envase: depois que os moldes das garrafas são produzidos, elas são encaminhadas para uma lavagem completa, tanto por dentro quanto por fora, utilizando um jato de água pressurizada com cloro;<sup>8</sup>

7 - Enchedora: nesta etapa, as garrafas são preenchidas com a bebida de forma isobárica, o que significa que o processo ocorre sob uma pressão constante;<sup>8</sup>

8 - Recravadora (rosqueadora): depois que a garrafa é completamente preenchida com a quantidade pré-definida, este equipamento rosqueia e aperta a tampa, assegurando o fechamento adequado;<sup>8</sup>

9 - Rotuladora: durante esta fase, a garrafa é submetida ao processo de rotulagem, onde é identificada com a aplicação do rótulo. Normalmente, este rótulo é fixado usando uma cola à base de cera de abelha para evitar qualquer impacto no sabor da bebida. A garrafa é colocada no equipamento e girada para garantir a aplicação precisa do rótulo;<sup>8</sup>

10 - Codificadora Ink Jet: a fase final da produção está quase finalizada. Neste ponto, o conjunto formado pela garrafa e pela tampa é submetido a um equipamento onde são gravados o lote, indicando de qual tanque específico a bebida foi retirada, e a data de validade na própria tampa da garrafa;<sup>8</sup>

11 - Embaladora: ao finalizar o processo, esta etapa consiste em agrupar as embalagens PET em lotes de seis ou doze unidades. Inicialmente, as garrafas são envolvidas por uma película plástica. Em seguida, este agrupamento prévio é submetido a um espaço aquecido a 180°C, onde o plástico é moldado e endurecido pelo resfriamento, assumindo a forma

das embalagens individuais e garantindo o fechamento adequado do conjunto de garrafas PET;<sup>8</sup>

12 - Paleitilização: essa etapa final garante a segurança durante o transporte do produto acabado, pois os conjuntos embalados são colocados em grades e então envolvidos por outra camada de filme plástico. Isso é realizado para prevenir quedas das embalagens durante o transporte.<sup>8</sup>

## Conclusões

A história do setor de refrigerantes no Brasil reflete a evolução tecnológica, econômica e cultural do país ao longo do tempo. Desde as primeiras indústrias familiares até as modernas fábricas, os refrigerantes se tornaram uma parte essencial da cultura brasileira, marcando momentos de celebração e união ao longo das décadas.

A análise detalhada da composição química e dos processos industriais revela a complexidade dessa indústria. Cada etapa, desde a seleção dos ingredientes até a embalagem final, é meticulosamente planejada e executada para garantir a qualidade e segurança do produto.

Os resultados destacam a importância dos ingredientes primários e dos aditivos na formulação dos refrigerantes, enquanto o processo de fabricação envolve uma variedade de operações e equipamentos.

É importante mencionar que a fabricação de bebidas, independentemente do sabor, segue processos similares em termos de estrutura e equipamentos. No entanto, a escolha dos sabores a serem produzidos é determinada antes da instalação da fábrica, permitindo a adaptação do espaço de acordo com os requisitos específicos de cada processo. Embora tenham sido mencionados dois sabores comuns de refrescos como exemplos, é viável produzir qualquer sabor desejado, desde que se façam ajustes na produção para a troca de sabores nos equipamentos, além de definir os ingredientes de cada fórmula.

Em resumo, a indústria de bebidas no Brasil é uma mistura fascinante de tradição, inovação e tecnologia, continuamente adaptando-se às necessidades e preferências dos consumidores. Este estudo oferece uma compreensão mais profunda não apenas dos refrigerantes, mas também dos processos que os tornam possíveis.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Pedro P. Marques.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 G. F. B. Cruz, Fabricação de Refrigerantes, *Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro*, Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, 2012.
- 2 BRASIL. Decreto nº 2.314, de 04 de setembro de 1997, *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*.
- 3 M. Menda, Refrigerantes, *Conselho Regional de Química 4ª Região*, 2011. Disponível em <https://crq4.org.br/default.php?p=texto.php&c=refrigerantes>
- 4 A. C. S. Lima, J. C. A. Afonso, A Química do Refrigerante, *Química Nova na Escola*, 2009.
- 5 BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 544, de 16 de novembro de 1998, *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*.
- 6 M. Fisberg, O. M. S. Amâncio, A. M. P. Lottenberg, O uso de refrigerantes e a saúde humana, *Pediatria Moderna*, **38**, 2002.
- 7 F. H. Borges, P. R. T. Dalcol, Indústria de processo: comparações e caracterizações, *XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Associação Brasileira de Engenharia de Produção*, 2002.
- 8 R. T. Ferreira, Fábrica de refrigerantes, 2009. Disponível em

<https://www.flickr.com/photos/ricardoterencio/3801071293/>

- 9 P. G. Palha, Tecnologia de refrigerantes. Rio de Janeiro: AmBev, 2005.
- 10 Ácido Cítrico ou Citrato de Hidrogênio, *ADITIVOS & INGREDIENTES*, 2014, **112**, 31-35, [http://www.insumos.com.br/aditivos\\_e\\_ingredientes/materias/268.pdf](http://www.insumos.com.br/aditivos_e_ingredientes/materias/268.pdf)

# Química verde do Carbono: Prévia de um futuro energético sustentável

DOI: 10.5281/zenodo.11092553

Paulo Resende Neto<sup>a\*</sup>

This article aims to discuss information on Green Carbon, a science in response to the global market's high demand for fossil fuels. Presenting some of its chemical principles, developments, and a vision of the market, going Beyond the practical laboratory environment.

O objetivo desse trabalho é propor um diálogo acerca de informações referentes ao carbono verde, uma ciência em resposta a alta demanda de combustíveis fósseis pelo mercado global. Apresentando alguns de seus princípios químicos, avanços, e uma visão do comércio, indo além da prática no ambiente laboratorial.

Universidade de Brasília - UnB. Campus Darcy Ribeiro - Instituto de Química.

\*E-mail: pauloresendeneto15@hotmail.com

**Palavras-chave:** Química verde; carbono; combustíveis; energia.

Aceito em 22 de março de 2024,

Aprovado em 26 de abril de 2024,

Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

Os 12 princípios da Química Verde representam um projeto inovador para redução e eliminação do emprego de substâncias prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Destacam-se medidas como o uso de solventes e auxiliares seguros e a busca pela eficiência energética.<sup>1</sup> Além disso, métodos energéticos provenientes do elemento químico carbono são amplamente reconhecidos pela sua importância no desenvolvimento da sociedade. No entanto, diante desse desafio preventivo para sustentabilidade que fora proposto por esses modelos, esse significativo fator energético precisa de desenvolvimento para adequar a um uso mais sustentável.<sup>2</sup>

Conforme a publicação *World Energy Outlook 2021* da *Internacional Energy Agency* (IEA), no cenário de políticas declaradas (STEPS), a demanda por combustíveis fósseis continua a crescer, com o uso do carvão se recuperando e previsto para se estabilizar na década de 2030.<sup>3</sup> As fontes de energia referentes ao carbono são empregadas principalmente na conversão de biomassa em combustíveis, produtos químicos e outros materiais, enquanto o hidrogênio é utilizado para formar sistemas de emissão zero de carbono. Entretanto, a produção verde desse material ainda não é suficiente para a demanda atual, de acordo com o *Global Hydrogen Review 2021* da IEA.<sup>4</sup>

O carbono e seus recursos são classificados como não renováveis, incluindo o petróleo e o carvão, e renováveis, como a biomassa e o CO<sub>2</sub>. O ciclo de consumo do carbono envolve, em sua base, o uso de matérias-primas fósseis para a conversão

em combustíveis, produtos químicos e materiais, resultando na liberação de dióxido de carbono ao final do processo. Surge, então, a iniciativa científica e tecnológica do desenvolvimento do carbono verde, que busca métodos de processamento eficiente desse elemento químico.<sup>5</sup>

As técnicas do carbono verde são divididas em quatro etapas distintas. Na primeira etapa, ocorre a otimização dos recursos de carbono, tais como o carvão, óleos e gases naturais, em que a eficiência e a utilização dos químicos são medidas e aprimoradas através da eficiência atômica. A segunda fase busca aperfeiçoar a conversão e a utilização de biomassa, visando minimizar a dependência de recursos fósseis. Em seguida, a terceira fase concentra-se na utilização do ciclo químico do carbono para equilibrar o ciclo natural, através da captura e uso do CO<sub>2</sub>. Por fim, na quarta fase desenvolvem-se rotas de reação utilizando CO<sub>2</sub> e água em conjunto com energias renováveis.<sup>2</sup>

Os trabalhos referenciados propõem um diálogo acerca das técnicas e práticas relacionadas ao desenvolvimento do carbono verde, visando destacar a importância dessa alternativa sustentável diante do crescente aumento da demanda desse material como fonte de energia.

## Metodologia

A elaboração e escrita deste artigo compila informações de artigos disponibilizados na plataforma Embase por meio do portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que

graças a comunidade Acadêmica Federada (CAFe) permite o acesso gratuito a conteúdos assinados para estudantes de comunidades federadas, como a Universidade de Brasília (UnB), por meio do login com seu e-mail institucional. O conteúdo apresentado no artigo foi obtido por via da pesquisa com as seguintes palavras-chave específicas: “química verde”, “carbono”, “combustíveis” e “energia”.

No artigo de referência, o autor Peng Gao e colaboradores,<sup>2</sup> compilam avanços nas pesquisas sobre o carbono verde, incluindo demonstrações industriais e aplicações comerciais, oferecendo uma visão além do ambiente laboratorial. Destaca-se os avanços em particular da transformação do carvão em combustíveis líquidos e produtos químicos, seja por meio da biomassa, dióxido de carbono ou do gás de síntese.

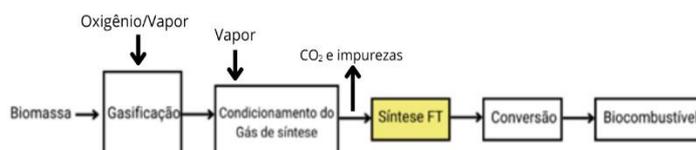
Os autores também delinham as fases da ciência do carbono verde supracitadas, de modo que também proporcionam uma visão atualizada dos desafios associados a essas práticas, ao mesmo tempo em que identificam potenciais oportunidades para essas tecnologias.

## Resultados e discussão

Na fase inicial da ciência do carbono verde, o objetivo principal é a aplicação eficaz de recursos compostos por carbono, tal que esses materiais possuem o potencial de mitigar questões ambientais e diminuir a dependência dos combustíveis derivados do petróleo. Atualmente, o desenvolvimento de indústrias químicas e energéticas são fortemente dependentes do petróleo e seus recursos, mas devido à sua disponibilidade limitada, há uma crescente busca por fontes alternativas capazes de sustentar a produção em larga escala de produtos químicos.<sup>2</sup>

O carvão, por meio de um gás de síntese, pode ser derivado em combustíveis e produtos químicos através da síntese de Fischer-Tropsch.<sup>2</sup> Um processo catalítico, ilustrado na Figura 1, de conversão de gás de síntese, como o monóxido de carbono e gás hidrogênio, em que seus produtos se assemelham ao petróleo,<sup>7</sup> esses combustíveis líquidos possuem hidrocarbonetos de maior peso molecular, que devido a essa característica apresentam um alto valor.<sup>8</sup> Essa técnica tem sido cada vez mais adotada em várias indústrias devido à sua capacidade de competir com o valor do petróleo bruto.<sup>6</sup>

**Figura 1.** Diagrama simplificado da síntese de Fischer-Tropsch.<sup>7</sup>



A segunda fase, por sua vez, envolve a conversão de biomassa, um material orgânico capaz de capturar energia solar através da energia química proveniente do carbono sólido. Apesar da grande quantidade de pesquisas sobre esse combustível, os recursos necessários para sua produção são limitados. Portanto, para obter matéria renovável de forma sustentável, o dióxido de carbono tem sido empregado.<sup>2</sup>

Uma abordagem da prática seguida pelos autores, é a produção de Etilenoglicol (EG) a partir de celulose. O etilenoglicol é um composto químico fabricado atualmente em grande escala, com cerca de 30 milhões de toneladas sendo fabricadas globalmente a cada ano, mas tradicionalmente derivado do petróleo. Em 2008, na *Dalian Institute of Chemical Physics* (DICP) o grupo de pesquisa liderado por Zhange Wang desenvolveu um método de conversão catalítica direta da celulose para o etilenoglicol. Esse método é considerado sustentável devido ao uso de água como solvente, uso de matéria-prima renovável e uma eficiência atômica elevada, variando de 60% a 80%. Além disso, o EG produzido derivado da celulose apresenta um valor de produção comparável ao obtido a partir do petróleo.<sup>2</sup>

A terceira fase, visa a redução da emissão de dióxido de carbono, que devido à sua capacidade de carbono de oxidar completamente, demanda um alto consumo de energia. Por isso, substâncias altamente energéticas como H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> têm sido empregadas para conversão do CO<sub>2</sub> em produtos importantes, como gases de síntese e metano.<sup>2</sup>

O Metano é o constituinte principal dos gases naturais e do biogás.<sup>5</sup> Portanto, a conversão de dióxido de carbono em metano emerge como uma alternativa para produção de energia. O hidrogênio é a fonte de energia primária para esse processo, mas pode ser substituído por métodos de produção energética verde, como hidroelétricas, solar e eólica. A *The Copenhagen Power-to-Gas Project* é o maior empreendimento comercial desse tipo no mundo, representando o enorme potencial para o desenvolvimento de sistemas energéticos sustentáveis.<sup>2</sup>

Na última etapa, a quarta fase o seu princípio consiste nas tecnologias de reciclagem do dióxido de carbono, como citado pelos autores microalgas, organismos unicelulares. São capazes de realizar a conversão do dióxido de carbono em açúcares e lipídeos, como também pontuam a conversão de dióxido de carbono e da água utilizando fontes de energia renovável. Um importante método é a conversão de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O respectivamente em metanol e H<sub>2</sub>, por meio da energia solar, que realiza a eletrólise da solução líquida de metanol.<sup>2</sup>

## Conclusões

Acerca do artigo em referência de Peng Gao e colaboradores,<sup>2</sup> evidencia-se a urgência do desenvolvimento de pesquisas em métodos energéticos alternativos, com foco especial no elemento químico carbono, especialmente diante da crescente na demanda por combustíveis fósseis que, apesar da alta eficiência, são limitados e prejudiciais ao meio ambiente, contrariando os princípios da química verde.

A ciência do carbono verde surge na busca de otimizar o uso de recursos provenientes do carbono, assim esses recursos terão um uso mais eficiente.<sup>2</sup> Em destaque, o carvão pode ser convertido em combustíveis e produtos químicos através da síntese de Fischer-Tropsch. Além de ser um método mais sustentável, possui um valor comercial comparável ao do petróleo bruto.<sup>6</sup>

Outro grande procedimento compilado pelos autores é a produção de etilenoglicol a partir de celulose, que exemplifica a conversão de biomassa, um dos pilares dessa ciência. O método aplicado além de apresentar uma eficiência atômica elevada, também é capaz de competir com EG proveniente do petróleo no mercado, pelo valor de produção semelhante.<sup>2</sup>

Os experimentos nas fases subsequentes reafirmaram a importância dessa ciência. Na terceira fase, busca-se reduzir a emissão de dióxido de carbono através da conversão em metano, um dos principais componentes dos gases naturais e do biogás. Já na quarta fase, o foco reside na utilização conjunta de CO<sub>2</sub> e água, aliados a fontes de energia renovável, como a energia solar. Isso possibilita a conversão desses reagentes em metanol e H<sub>2</sub>, respectivamente, através da eletrólise da solução líquida de metanol.<sup>2</sup>

A compilação de abordagens relacionadas ao desenvolvimento do Carbono Verde destaca efetivamente a importância dessa alternativa sustentável para alcançar os

objetivos da química verde. Esses avanços representam progressos significativos na utilização de recursos renováveis para mitigar os impactos ambientais e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de detalhes obtidos por artigos auxiliares são de Paulo Resende Neto.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 E. J. Lenardão, R. A. Freitag, M. J. Dabdoub, A. C. F. Batista and C. D. C. Silveira, 'Green chemistry': os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa, *Quím. Nova*, 2003, **26**, 123–129. R. F. W. Bader, *Atoms in Molecules: A Quantum Theory*,
- 2 P. Gao, L. Zhong, B. Han, M. He and Y. Sun, Green Carbon Science: Keeping the Pace in Practice, *Angew Chem Int Ed*, 2022, **61**, e202210095.
- 3 **World Energy Outlook 2021** – Analysis, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, (accessed March 20, 2024).
- 4 **Global Hydrogen Review 2021** – Analysis, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>, (accessed March 20, 2024).
- 5 M. He, Y. Sun and B. Han, Green Carbon Science: Efficient Carbon Resource Processing, Utilization,

and Recycling towards Carbon Neutrality, *Angewandte Chemie*, 2022, **134**, e202112835.

- 6 G. J. Suppes and T. S. Storvick, Eds., in Sustainable Nuclear Power, *Academic Press*, Burlington, 2007, pp. 75–117.
- 7 Fischer-Tropsch synthesis, [https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP\\_B\\_Factsheet\\_FT\\_R1.pdf](https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP_B_Factsheet_FT_R1.pdf) (accessed 1 April 2024).
- 8 10.2. Fischer-Tropsch Synthesis, <https://netl.doe.gov/research/carbon-management/energy-systems/gasification/gasifipedia/ftsynthesis>, (accessed 1 April 2024).

# Uma análise composicional do concreto romano e suas implicações na engenharia e na arquitetura moderna.

DOI: 10.5281/zenodo.11092601

Bárbara Emília Ribeiro Alcântara<sup>a\*</sup>

Throughout the article, techniques used to analyze concrete structures are discussed, as well as a comparison between modern cement and the material that was used in ancient Rome. The text portrays the current challenges of civil construction and how the knowledge of the ancient people could help to overcome them.

Ao longo do artigo, são abordadas técnicas utilizadas para análise de estruturas de concreto, além de uma comparação entre o cimento moderno e o material que era utilizado na Roma antiga. O texto retrata os desafios atuais da construção civil e como o conhecimento dos povos mais antigos poderia ajudar a superá-los.

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: barbaraemiliaalcantara@gmail.com

**Palavras-chave:** Cimento Portland; estruturas romanas; pegada de carbono; sustentabilidade.

Aceito em 22 de março de 2024,

Aprovado em 25 de abril de 2024,

Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

**A extraordinária resistência e durabilidade do concreto utilizado pelos romanos antigos têm fascinado e inspirado pesquisadores e profissionais da engenharia e arquitetura modernas. Este material milenar, fundamental na construção de maravilhas arquitetônicas como o Panteão e os aquedutos romanos, deve sua resiliência a uma combinação singular de ingredientes, incluindo cal, água, cinzas e rochas de origem vulcânica. Ao contrário do concreto moderno, aquele produzido na Roma antiga demonstra uma pegada de carbono significativamente menor, devido principalmente à sua formulação e processo de produção menos intensivos em energia. A durabilidade de estruturas romanas, algumas das quais permaneceram intactas por mais de 2.000 anos em ambientes marinhos agressivos, ressalta a superioridade desse antigo material de construção em termos de longevidade e sustentabilidade.**<sup>1,2</sup>

Em comparação, o concreto Portland, descoberto no século XIX, é hoje o cimento mais utilizado em construções ao redor do mundo. No Brasil, esse material é regido pela norma ABNT NBR 16697,<sup>3</sup> que especifica os requisitos que o cimento Portland deve atender para garantir sua qualidade e adequação para uso em diversos tipos de obras, desde construções residenciais até infraestruturas de grande porte. De acordo com esta norma, o cimento Portland é um material aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste principalmente de silicatos de cálcio hidráulicos, junto a uma ou mais formas de sulfato de cálcio, conhecido

como gesso, como adição para controle do tempo de pega. Esse material também contém aluminatos e ferroaluminatos de cálcio que, apesar de estarem presentes em menor quantidade, são igualmente importantes para o processo de formação do concreto.<sup>3</sup>

O clínquer, componente principal do cimento Portland, é produzido pela calcinação de uma mistura finamente moída de minerais como calcário, argila ou xisto em um forno rotativo. Esse processo de aquecimento contribui para aproximadamente 5% das emissões globais de CO<sub>2</sub> de origem antropogênica. Assim, embora o concreto Portland seja admirado por sua resistênciparticura e versatilidade, a questão da sustentabilidade ambiental levanta preocupações significativas, incentivando a busca por alternativas mais sustentáveis.<sup>1,3</sup>

**Figura 1.** Panteão. Imagem de Mariam (autor registrado no pixabay como “MariamS”) disponibilizada em <https://pixabay.com/pt/photos/pante%C3%A3o-it%C3%A1lia-roma-arquitetura-448439/>.



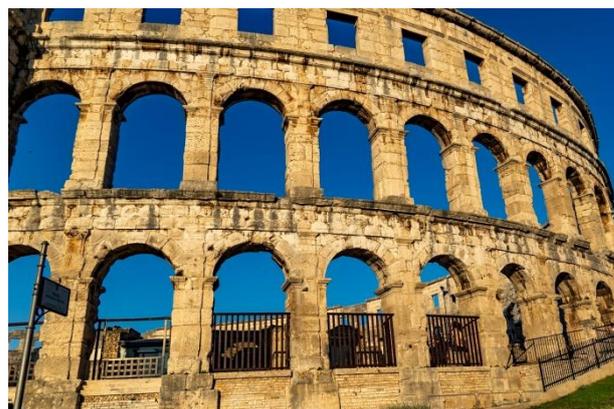
A comparação entre o concreto romano e o concreto Portland revela diferenças fundamentais, não apenas em composição e propriedades físicas, mas também em impacto ambiental. Enquanto o concreto romano se beneficia de uma reação química natural com a água do mar para fortalecer sua estrutura ao longo do tempo, o concreto Portland exige medidas adicionais para proteger suas estruturas contra a corrosão e a deterioração.

Essa reação química natural com a água do mar ocorria principalmente devido a um dos materiais vulcânicos chamado de “pozolana”, uma cinza vulcânica encontrada em áreas próximas a Roma, especialmente em Pozzuoli, na Baía de Nápoles.<sup>11</sup> De maneira geral, os materiais pozolânicos são compostos silicosos ou sílico-aluminosos que, ao serem moídos com água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes.<sup>12</sup> Essa reação cria uma solução saturada em cálcio, na qual ocorre a formação de cristais de aluminato e silicato de cálcio hidratado dentro da mistura de concreto. Esses cristais ajudam a unir os componentes do concreto, aumentando sua coesão e densidade.<sup>13</sup>

A questão ecológica emerge como um ponto crucial nesta análise comparativa. A capacidade do concreto romano antigo de minimizar a pegada de carbono, enquanto oferece uma solução duradoura para construções em ambientes desafiadores, fornece ideias valiosas para o desenvolvimento de novos materiais de construção que combinem durabilidade, eficácia estrutural e responsabilidade ambiental.

Nesse sentido, um dos principais focos dos estudos desse material está na sua interação com a água, uma vez que um dos pontos que afeta a durabilidade do concreto é a penetração de água nesse. Logo, a adsorção da água no concreto romano é um aspecto chave que, atualmente, pode ser considerado como um dos fatores que contribui para sua notável resistência ao longo dos milênios, particularmente em ambientes submersos ou que estejam em contato intermitente com a água.<sup>5</sup>

**Figura 2.** Arena de pula. Imagem de Alexandru Manoele (autor registrado no pixabay como “alexman89”) disponibilizada em <https://pixabay.com/pt/photos/arena-de-pula-arquitetura-estrutura-6618265/>.



Portanto, este artigo visa explorar a composição química do concreto romano e suas implicações para a engenharia e arquitetura modernas. Com isso, serão abordados não apenas a história e os segredos da sua resistência, mas também a relevância dessas descobertas para enfrentar os desafios contemporâneos de construção, incluindo a necessidade urgente de reduzir as emissões de carbono na indústria da construção.

## Metodologia

Devido às características do concreto romano, já citadas anteriormente, muitos pesquisadores modernos têm se interessado pela análise das propriedades microscópicas desse material, com o objetivo de aplicar tais conhecimentos no desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis e duráveis na atualidade. Desse modo, técnicas como microscopia eletrônica, microdifração de raios X, espectroscopia Raman e microsonda eletrônica estão sendo cada vez mais utilizadas nas pesquisas químicas e arqueológicas dos compostos presentes no concreto.<sup>4</sup>

Para o desenvolvimento do trabalho que culminou no artigo de referência,<sup>1</sup> foram utilizadas amostras perfuradas de um “*Hospitium*”, palavra oriunda do latim que era empregada na era greco-romana para designar o lugar onde as pessoas se hospedavam por determinado período, em Pompéia. Para análise das amostras, foram adotadas as técnicas de microtomografia síncrotron ( $\mu$ CT) e radiografia de nêutrons, com o objetivo de estudar como a microestrutura do material, inclusive com trincas (rachaduras) induzidas, afeta a adsorção de água. Ademais, para medir a porosidade, foi utilizado um Porosímetro de Mercúrio Thermo-Finnigan

Pascal Série 240 equipado com uma unidade de baixa pressão.

## Resultados e discussão

Os autores<sup>1</sup> iniciaram o trabalho analisando a porosidade dos blocos de concreto romano por porosimetria por intrusão de mercúrio. Desse modo, os estudos destacaram a presença de uma distribuição de tamanho de poros única no concreto romano, com poros significativamente maiores do que os encontrados no concreto moderno, particularmente o concreto de cimento Portland. Esta porosidade vista no concreto romano possui uma estrutura capaz de facilitar a distribuição e a movimentação da água de maneira que potencialmente contribui para a sua capacidade de autocura, onde fissuras e danos internos podem ser mitigados ou reparados ao longo do tempo através da formação de novos minerais.

Além disso, a análise das amostras de concreto romano revelou que a água é distribuída uniformemente por todo o material, evidenciando um sistema de poros conectados que desempenha um papel crucial na dinâmica de absorção de água. Tal fato não apenas permite que o concreto "respire" e se ajuste a variações ambientais, mas também restringe a penetração de água a níveis que poderiam levar a danos estruturais mais graves, como a erosão química.<sup>6</sup>

A investigação também mostrou que, no concreto romano, as fissuras tendem a não se propagar de maneira descontrolada como em alguns materiais modernos. Ao invés disso, a formação de novos poros e a redistribuição da porosidade em torno de áreas danificadas indicam uma capacidade notável do material de redistribuir tensões e "curar" áreas problemáticas internamente, um aspecto que contribui muito para a sua durabilidade.

Outro ponto observado no estudo foi que a análise dos materiais revelou que as características específicas da matriz cimentícia romana, incluindo a presença de fibras e a composição química única resultante do uso de materiais vulcânicos, conferem ao concreto uma capacidade de absorver energia mecânica e resistir a falhas catastróficas de maneira mais eficaz do que muitos materiais de construção modernos.

Por fim, o estudo das interações microestruturais e da dinâmica da água no concreto romano antigo sugere que sua capacidade de gerenciar a penetração e distribuição de água, juntamente com um mecanismo inerente de autocura, são fatores-chave para a sua notável durabilidade. Isso

significa que, quando se desenvolvem fissuras, os materiais dentro do concreto podem reagir com a água para formar novos minerais que preenchem essas fissuras ao longo do tempo. Esse processo de autocura é parcialmente atribuído à presença de materiais vulcânicos (como a pozolana) na mistura do concreto, que podem reagir com a cal hidratada e a água para formar novos cristais de hidratos de cálcio e outros minerais alcalinos.

## Conclusões

A investigação aprofundada sobre a composição e as propriedades do concreto romano antigo, em comparação com o concreto Portland moderno, revela um legado de engenharia e sustentabilidade que transcende milênios. A análise composicional desse material milenar não somente desvenda os segredos de sua resistência e durabilidade extraordinárias, mas também oferece lições valiosas para enfrentar os desafios contemporâneos na engenharia e arquitetura modernas. Os resultados deste estudo destacam a importância da microestrutura, porosidade e capacidade de autocura do concreto romano na promoção de uma longevidade sem precedentes, mesmo em condições ambientais adversas.

Assim, é particularmente notável o processo de autocura mediado pela água, que se revela fundamental para a durabilidade do concreto romano. Essa capacidade de reparar fissuras internas através da formação de novos minerais não só sublinha a superioridade do concreto romano em termos de manutenção estrutural, mas também aponta para uma direção promissora na busca por materiais de construção mais resilientes e auto-sustentáveis.

Além disso, a questão ecológica emergente deste estudo não pode ser subestimada, tendo em vista que a pegada de carbono significativamente menor do concreto romano, em comparação com o concreto Portland, ressalta a necessidade urgente de desenvolver alternativas de construção mais benéficas ao meio ambiente. Ademais, a capacidade do concreto romano de resistir ao teste do tempo oferece uma perspectiva valiosa para a inovação no design e na composição de materiais de construção modernos.

Em suma, ao integrar as lições aprendidas com o concreto romano antigo, a engenharia e a arquitetura modernas estão diante de uma oportunidade única de avançar em direção a práticas mais duráveis e ecologicamente responsáveis. Este estudo não só homenageia o legado dos engenheiros e arquitetos romanos, mas também serve como um chamado à ação para repensar e inovar no uso de materiais de construção. Dessa forma, ao abraçar as

estratégias do passado, torna-se viável abrir caminho para soluções inovadoras que respondam às exigências do presente e do futuro, alinhando durabilidade e sustentabilidade em um equilíbrio harmonioso.

## Contribuições por Autor

O artigo e a inclusão de algumas observações são de Bárbara Emília Ribeiro Alcântara.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial. Agradeço também ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 K. Xu, A. S. Tremsin, J. Li, D. M. Ushizima, C. A. Davy, A. Bouterf, Y. T. Su, M. Marroccoli, A. M. Mauro, M. Osanna, A. Telesca and P. J. M. Monteiro, Microstructure and water absorption of ancient concrete from Pompeii: An integrated synchrotron microtomography and neutron radiography characterization, *Cement and Concrete Research*, 2021, **139**, 106282.
- 2 A. P. F. Soares, L. T. Vasconcelos, F. B. C. Nascimento, Corrosão em armaduras de concreto, *Cadernos de Graduação*, 2015.
- 3 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 16697, Cimento Portland - Requisitos, Rio de Janeiro, RJ, 2018, [https://saturno.crea-rs.org.br/pop/profissional/ABNT\\_NBR\\_16697\\_2018.pdf](https://saturno.crea-rs.org.br/pop/profissional/ABNT_NBR_16697_2018.pdf).
- 4 F. Marra, M. Anzidei, A. Benini, E. D'Ambrosio, M. Gaeta, G. Ventura e A. Cavallo, Características petroquímicas e áreas de origem de agregados vulcânicos usados em concretos marítimos romanos antigos, *Journal of Volcanology e Pesquisa Geotérmica*, 2016, **328**, 59–69.
- 5 Redação, Concreto do futuro vem de Roma Antiga, <https://habitability.com.br/concreto-do-futuro-vem-da-roma-antiga/> (acessado em 22 de março de 2024).
- 6 J. MacFarlane, T. Vanorio e PJM Monteiro, Imagens em múltiplas escalas, medições de resistência e permeabilidade: Compreendendo a durabilidade do concreto marinho romano, *Construção e Materiais de Construção*, 2021, **272**, 121812.
- 7 Cientistas descobrem o segredo por trás da resistência do concreto romano, <https://www.archdaily.com.br/br/875474/cientistas-descobrem-o-segredo-por-tras-da-resistencia-do-concreto-romano>, (acessado em 22 de março de 2024).
- 8 F. Marra, A. Danti e M. Gaeta, O agregado vulcânico de argamassas romanas antigas do Monte Capitolino: Critérios petrográficos para identificação das “pozolanas” de Roma e implicações históricas, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, **308**, 113–126.
- 9 L. F. Kaefer, A evolução do concreto armado, São Paulo, 1998.
- 10 H. S. Kramer, R. C. A. Lima, F. V. Romano, S. S. Silva, Reações expansivas internas no concreto: uma revisão sistemática, *IBRACON*, 2020.
- 11 Riddle solved, <https://news.mit.edu/2023/roman-concrete-durability-lime-casts-0106>, (accessed 2 April 2024).
- 12 G. C. Cordeiro and J. M. Désir, Potencial de argila caulínica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência, *Cerâmica*, 2010, **56**, 71–76.
- 13 paulpreuss, Roman Seawater Concrete Holds the Secret to Cutting Carbon Emissions - Berkeley Lab, <https://newscenter.lbl.gov/2013/06/04/roman-concrete/>, (accessed 2 April 2024).

# Explorando o Mercado Brasileiro: Produção e Legislação vigente das Bebidas Energéticas

DOI: 10.5281/zenodo.11089871

Linara Tarusa D. Correa,<sup>a\*</sup> Luiza P. F. de Souza,<sup>b\*</sup>  
Paulo R. Neto,<sup>c\*</sup> Pedro Paulo S. M. Pinto<sup>d\*</sup> e  
Victoria P. Silva<sup>e\*</sup>

This article aims to compile and review data on the production of energy drinks and discuss the peculiarities of their components. With the significant increase in consumption and expansion of this market, which involves a series of complex procedures for its production, this study seeks to highlight the legislation that ensures the safety of these products for consumption in Brazil and globally.

O objetivo deste trabalho é compilar e revisar dados referentes à produção de bebidas energéticas e discutir sobre as peculiaridades de seus componentes. Com o significativo aumento do consumo e expansão desse mercado, o qual envolve uma série de processos complexos para sua produção, busca-se nesse artigo destacar as legislações que asseguram a segurança desses produtos para o consumo no Brasil e globalmente.

<sup>a</sup> Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: linara.tarusa@gmail.com

<sup>b</sup> Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: luiza2001.pedrosa@gmail.com

<sup>c</sup> Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: pauloresendeneto15@hotmail.com

<sup>d</sup> Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: pppmarques01@gmail.com

<sup>e</sup> Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: vickiprs@gmail.com

**Palavras-chave:** bebida energética, legislação, cafeína, aditivos.

Aceito em 19 de março de 2024,

Aprovado em 26 de abril de 2024,

Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) utiliza a nomenclatura bebida energética, ou *energy drink*,<sup>1</sup> para compostos líquidos pronto para o consumo que podem conter em sua composição ingredientes como inositol, glucoronolactona, taurina e cafeína. Essas bebidas também costumam incluir vitaminas, carboidratos, aromatizantes e corantes segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e de Bebidas não Alcoólicas (ABIR).<sup>2</sup> Contudo, mesmo antes da atual legislação trazer essa nomenclatura, o termo bebida energética já era utilizado na denominação desses produtos no Brasil, devido ao aumento da sensação de alerta e vigor, ou seja, maior energia e disposição para o indivíduo.<sup>3</sup>

A cafeína presente nos energéticos é um dos principais responsáveis pela melhora do desempenho físico, da resistência e da atenção, por se tratar de um estimulante do sistema nervoso central que inibe a ação da adenosina.<sup>4</sup> Seu consumo é relativamente seguro em adultos saudáveis, mas pode ser nocivo para pessoas mais vulneráveis como mulheres

grávidas, crianças e pessoas com transtornos mentais.<sup>4,5</sup> Geralmente, uma lata de 250 mL de energético contém 80 mg de cafeína, o que é uma quantidade segura, porém deve-se ter atenção para não consumir em excesso.<sup>2</sup>

A taurina, por sua vez, tem funções na regulação osmótica, função imunológica, no metabolismo da glicose, desenvolvimento neurológico e da retina.<sup>2</sup> Apesar de desempenhar importantes papéis no organismo, tanto a cafeína quanto a taurina em excesso foram relacionadas ao desenvolvimento de problemas cardiovasculares.<sup>6,7</sup> O aumento do consumo de bebidas açucaradas e artificialmente adoçadas também foi relacionado ao aumento do risco de desenvolver doenças cardíacas.<sup>8</sup>

Nesse sentido, o aumento do consumo das bebidas energéticas nos últimos anos gerou uma preocupação com a saúde de seus consumidores, que são principalmente jovens, atletas, estudantes universitários e indivíduos ativos. Uma vez que os fabricantes modificam seu mercado-alvo para apresentar essas bebidas como reposições diárias ao invés de usos esporádicos.<sup>9</sup>

Ademais, os jovens aumentaram o consumo de energéticos misturados com álcool o que pode gerar outros problemas, uma vez que tanto o álcool quanto a cafeína podem causar arritmias. Além disso, estudos sugerem que essa mistura pode mascarar o efeito do álcool no organismo, levando a um maior consumo do mesmo e consequentemente gerar acidentes, no entanto existem divergências sobre esse assunto na literatura.<sup>10</sup>

Apesar de existirem essas contra indicações ao consumo excessivo de energéticos, análises comprovam que o consumo moderado de bebidas energéticas, correspondente a uma ingestão de cafeína de até 200 mg é improvável de representar um risco para a saúde cardiovascular de adultos saudáveis.<sup>10</sup> Além do que, as bebidas esportivas são excelentes para treinos, pois podem prevenir a desidratação, sendo uma boa fonte de eletrólitos (potássio, sódio, magnésio, cálcio) e carboidratos.<sup>9</sup> Seu consumo também pode melhorar a resistência, o desempenho em sprints repetidos e tarefas específicas do esporte no contexto de esportes coletivos, além de melhorar o foco mental, a vigilância, o desempenho anaeróbico e/ou o desempenho de resistência com doses maiores que 3 mg/kg de peso corporal.<sup>4</sup>

No Brasil, as bebidas energéticas estão sujeitas à regulamentação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que estabelece limites para as concentrações de cafeína e taurina, sendo 350mg por litro e 400mg por 100ml, respectivamente. Além disso, a regulamentação nacional requer que as embalagens dessas bebidas contenham avisos sobre o consumo, alertando grupos específicos que possam ser mais sensíveis à cafeína.<sup>2</sup>

Dessa forma, esse artigo busca fazer uma revisão da produção de bebidas energéticas no Brasil, desde sua produção até o seu envase, e trazer suas legislações específicas que garantem a segurança dos consumidores, a fim de orientar produtores e prevenir possíveis doenças geradas pelo consumo de bebidas que não se adequem às normas.

## Metodologia

A elaboração e escrita deste artigo de revisão reuniram informações disponibilizadas de plataformas como o portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que graças a comunidade Acadêmica Federada (CAFe) é permitido o acesso gratuito a conteúdos assinados pelo portal para estudantes de comunidades federadas, como a Universidade de Brasília (UnB), por meio do login com seu e-mail institucional. O

conteúdo apresentado no artigo foi obtido por via da pesquisa com as seguintes palavras-chave específicas: “Energéticos”, “Aditivos” e “Regulamento”.

A produção de bebidas energéticas se destacou com um dos segmentos de maior expansão do mercado de bebidas funcionais, entre 2006 e 2007. Sendo os ingredientes mais recorrentes a cafeína, inositol e a taurina. Um energético para análise deve possuir um pH igual a 3, que se trata do valor encontrado no mercado.<sup>11</sup> Dados obtidos em pesquisas nos Estados Unidos, apontam marcas destaque no consumo como a Monster e Red Bull, mantém o pH de suas bebidas em 3,48 e 3,43 respectivamente.<sup>12</sup>

Pequenos detalhes como os citados evidenciam a complexidade e vasta quantidade de informações que podem ser compiladas e pesquisadas para revisão química da produção de bebidas energéticas no Brasil.

## Resultados e discussão

### Equipamentos

O processo de produção de uma bebida energética pode ser resumido na produção do xarope simples, que inclui a dissolução do açúcar e dos principais compostos do energético (cafeína, inositol e/ou taurina) na água. Depois é feito o xarope composto, que inclui a adição de aditivos como aroma, sabor, corante, acidulante, conservante, vitaminas, minerais, entre outros. Por fim, é feita a gaseificação com a adição de CO<sub>2</sub>. Portanto, para todas essas etapas exigem equipamentos específicos, sendo importante ressaltar que na indústria existem diversos modelos de maquinário, dessa forma, a presente revisão irá apontar equipamentos gerais.

A água deve apresentar algumas características específicas para que não altere o produto final. Portanto, em geral as fábricas de produção de energético possuem uma parte de equipamentos destinada a um segundo tratamento de água, visto que esta já passa pelo tratamento tradicional para se tornar apta ao consumo. Portanto, da mesma forma como nas Estações de Tratamento de Água (ETA) ocorre a floculação, decantação para a remoção de partículas, filtração e cloração.<sup>13</sup>

A produção dos xaropes ocorre em tanques de aço inoxidável equipados com agitador controlado, assegurando a completa homogeneização dos componentes e prevenindo a entrada de ar. O controle da agitação desempenha um papel crucial na preservação das vitaminas, evitando sua degradação. Adicionalmente, durante esta fase, a adição dos ingredientes

segue uma abordagem gradual, conforme a sequência estabelecida na formulação. A ordem de adição é de suma importância para evitar possíveis interferências entre os ingredientes. Por exemplo, o conservante é adicionado como segundo componente, imediatamente após o açúcar, para prevenir a floculação, que poderia ocorrer se o conservante fosse adicionado após o acidulante.<sup>14</sup>

O xarope é então direcionado através de tubulações de aço inoxidável até a linha de envase, onde são adicionados água e CO<sub>2</sub>. Para o processo de carbonatação, é empregado um carbonatador com capacidade de resfriamento, uma vez que a solubilidade do gás em água é inversamente proporcional à temperatura. Portanto, quanto menor a temperatura do equipamento, maior será a solubilidade do gás na água. Ademais, é essencial que o equipamento permita a regulagem da pressão de CO<sub>2</sub> no saturador, visando manter a qualidade final do produto.<sup>15</sup>

O produto é colocado na embalagem através de equipamentos chamados enchedores. Por fim, ao sair do equipamento de envase as latas seguem automaticamente, por um trilho transportador, para a máquina de rotulagem das embalagens, chamada de rotuladora.

## Produção do Xarope simples

A fabricação de bebidas energéticas envolve uma série de processos complexos, sendo a produção do xarope simples uma etapa fundamental. O xarope simples, também conhecido como calda base, é uma solução aquosa de açúcar essencial para a formulação dessas bebidas. Seu processo de fabricação passa por diversas etapas, desde a preparação até o tratamento para garantir sua qualidade.<sup>16</sup>

O processo de produção do xarope simples começa com a seleção e armazenamento do açúcar. O açúcar granulado, geralmente sacarose, é misturado com água tratada para formar o chamado "açúcar líquido".<sup>17</sup> Esse açúcar pode ser sacarose, glicose e xaropes, podendo ser substituídos por sacarose invertida, frutose e glicose, de acordo com a legislação brasileira para refrigerantes.<sup>18</sup> A proporção de açúcar pode variar, mas geralmente é adicionado em uma concentração de 8 a 12% do produto final e tem a função de fornecer o gosto doce, realçar o sabor dos componentes, encorpar a bebida e auxiliar na estabilidade do CO<sub>2</sub> no meio.<sup>17</sup> Além disso, estudos apontam que a glicose e a sacarose são fundamentais para o funcionamento do sistema nervoso central, sendo fontes de combustível essenciais para o

cérebro.<sup>19</sup> Em seguida, esse açúcar líquido é submetido a um processo de dissolução no tanque de aço inoxidável.

Durante o processo de dissolução, a água é aquecida para facilitar a dissolução do açúcar. A temperatura geralmente varia entre 85°C e 100°C. Esse aquecimento não apenas ajuda na dissolução do açúcar, mas também ajuda a remover impurezas que podem afetar o sabor e o odor do produto final. Após a dissolução, o xarope é tratado e clarificado usando elementos como carvão ativado em pó e terra diatomácea. Esses materiais ajudam a remover qualquer cor ou odor indesejado do xarope.<sup>16</sup>

Após o tratamento e clarificação, o xarope simples passa por um processo de filtração para remover qualquer impureza remanescente. Esse processo de filtração geralmente envolve o uso de elementos filtrantes, como celulose, polipropileno, algodão, nylon 66 hidrofílico, entre outros.<sup>17</sup>

## Água

Na formulação da bebida energética, a água desempenha um papel crucial, sendo a principal componente responsável pela dissolução dos outros elementos. É de suma importância que a qualidade da água atenda a critérios específicos. Idealmente, ela deve ter um pH neutro, uma baixa quantidade de cloro e fenóis, e estar livre de metais e microorganismos.

O pH neutro é significativo porque uma água mais alcalina pode interagir com ácidos orgânicos presentes na composição, como o ácido ascórbico e o ácido cítrico, afetando o sabor da bebida. A redução do cloro é crucial para prevenir reações de oxidação que impactam na cor final da bebida. A presença de fenóis, comum durante a gaseificação, pode transferir seu sabor característico para a bebida, sendo considerada também prejudicial à saúde.

Por fim, a inexistência de metais como ferro, cobre e manganês é vital, pois esses elementos podem acelerar processos de oxidação, resultando na deterioração do produto final.

A legislação estabelece que a água utilizada deve manter a estabilidade da composição da bebida, garantindo que sua adição não altere suas características físicas e sensoriais. Assim, o Ministério da Saúde, por meio da Portaria nº 2914 de 12 de Dezembro de 2011, define os parâmetros microbiológicos e físico-químicos para que a água atenda ao padrão de potabilidade exigido para o consumo.<sup>20</sup>

## Açúcar

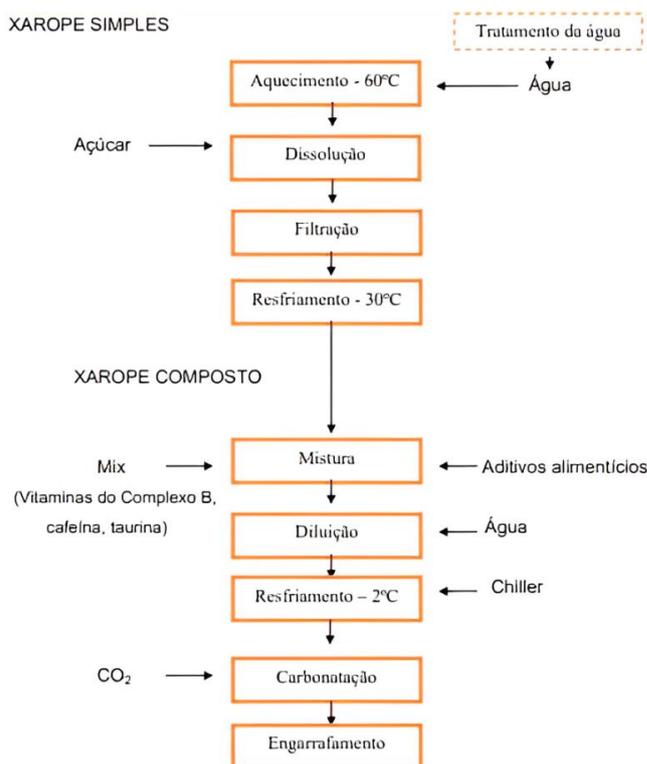
Com relação a legislação acerca do açúcar, por ser um produto similar ao refrigerante a bebida energética segue a legislação brasileira para refrigerantes no que tange a adição desse insumo. Dessa forma, a Instrução Normativa nº17<sup>21</sup> aponta que a sacarose, ou seja, o açúcar refinado ou cristal, pode ser substituída total ou parcialmente por sacarose invertida, frutose, glicose e seus xaropes.

## Produção do Xarope composto

O processo de produção do xarope composto começa com a seleção cuidadosa dos ingredientes. Além do xarope simples, que serve como base, o xarope composto pode conter uma variedade de aditivos, como taurina, cafeína, glucuronolactona, inositol, vitaminas B3, B5, B2, B6 e B12, acidulante regulador de acidez e outros estimulantes e nutrientes. Esses ingredientes são escolhidos com base em suas propriedades funcionais e sensoriais, com o objetivo de criar uma bebida energética eficaz e atraente para os consumidores.<sup>22</sup>

Uma vez selecionados os ingredientes, o xarope composto é preparado em tanques de mistura sob condições controladas de temperatura e agitação. Os ingredientes são adicionados ao xarope simples em quantidades precisas, de acordo com a formulação específica de cada bebida. Durante o processo de mistura, é importante garantir uma distribuição uniforme dos ingredientes para garantir a consistência e qualidade do produto final.<sup>23</sup> Abaixo apresentamos um fluxograma do processamento da bebida energética.<sup>24</sup>

**Figura 1.** Fluxograma do processamento de bebida energética. Extraído da referência 24.



## Vitaminas e Minerais

Conforme a regulamentação em vigor, a inclusão de vitaminas e minerais em produtos pode alcançar até 100% da Ingestão Diária Recomendada (IDR) por porção. A IDR indica a quantidade de nutrientes recomendada para consumo diário, visando atender às necessidades nutricionais. Portanto, as tabelas 1 e 2 detalham as proporções permitidas de vitaminas e minerais, respectivamente, para adição. É importante destacar que outros ingredientes podem ser incluídos, desde que sua presença não modifique a característica fundamental do produto.<sup>25</sup>

**Tabela 1.** Ingestão Diária Recomendada (IDR) de vitaminas.

Vitamina	IDR
Vitamina A	600 µg
Vitamina C	45 mg
Vitamina E	10 mg

Vitamina B1	1,2 mg	Fósforo	700 mg
Vitamina B2	1,3 mg	Flúor	4 mg
Vitamina B3	16 mg	Cobre	900 µg
Vitamina B5	5 mg	Selênio	34 µg
Vitamina B6	1,3 mg	Molibdênio	45 µg
Vitamina B7	30 mg	Cromo	35 µg
Vitamina B8	550 mg	Manganês	2,3 µg
Vitamina B9	240 µg		
Vitamina B12	2,4 µg		
Vitamina K	65 µg		

**Tabela 2.** Ingestão Diária Recomendada (IDR) de minerais.

Mineral	IDR
Cálcio	1000 mg
Ferro	14 mg
Magnésio	260 mg
Zinco	7 mg
Iodo	130 µg

### Aditivos

A Secretaria de Vigilância Sanitária, por meio da Portaria N° 540,<sup>26</sup> define aditivo como qualquer substância alimentar que não é consumida regularmente ou que é pouco utilizada como ingrediente principal em alimentos, podendo ou não possuir valor nutricional. Sua adição intencional a um produto visa melhorar alguma característica físico-química e organoléptica em qualquer fase da fabricação, incluindo preparação, tratamento, envase, transporte ou armazenamento.

É importante ressaltar que no Brasil, o órgão que regulamenta o uso de aditivos em alimentos é a ANVISA, dessa forma Resolução RDC n° 5, de 15<sup>27</sup> de janeiro de 2007 traz consigo as quantidades permitidas de cada aditivo em bebidas energéticas. Nas bebidas energéticas, as classes de aditivos mais comumente empregadas incluem os acidulantes, que conferem acidez ao produto; os reguladores de acidez, que controlam o pH; os aromatizantes, que fornecem aroma característico; os corantes, que adicionam cor ao produto; os conservantes, que prolongam a vida útil; e os antioxidantes, que previnem a oxidação dos componentes.

### Aromatizante

Conforme estabelecido pela legislação em vigor,<sup>28</sup> os aromatizantes podem ser categorizados de várias maneiras, uma delas sendo os naturais, que são obtidos exclusivamente por métodos físicos, microbiológicos ou enzimáticos, a partir de matérias-primas aromatizantes naturais de origem animal ou vegetal, considerados seguros para consumo humano. Por

outro lado, os aromatizantes sintéticos são compostos quimicamente identificados, obtidos por processos químicos.

Na indústria de bebidas energéticas, os aromas predominantes podem ser divididos em duas categorias: os aromas sintéticos e os aromas naturais. Os aromas sintéticos abrangem tanto os artificiais quanto os idênticos aos naturais, enquanto os aromas naturais são extraídos de fontes naturais, como extratos líquidos de plantas ou frutas.

### **Acidulante**

Os acidulantes desempenham um papel crucial nas bebidas gaseificadas, regulando a doçura do açúcar, realçando o paladar e reduzindo o pH para inibir o crescimento de microorganismos.<sup>29</sup> O ácido cítrico (INS 330) é frequentemente utilizado como acidulante em bebidas energéticas devido às suas características de sabor, capacidade de regular o pH e estabilizar a carbonatação, além de prolongar a estabilidade da vitamina C. Com aproximadamente 70% da produção global destinada à indústria alimentícia, sua excelente solubilidade o torna especialmente adequado para ser usado em xaropes concentrados, graças à sua aceitabilidade de sabor, segurança para consumo e facilidade de absorção pelo corpo humano.<sup>30</sup>

### **Regulador de acidez**

Na indústria alimentícia, são frequentemente empregados diversos reguladores de acidez, como carbonato de cálcio, ácido acético, acetato de cálcio, ácido láctico, ácido málico e citrato de sódio.<sup>35</sup> No entanto, nas bebidas energéticas, o citrato de sódio (INS 331) é o mais prevalente, sendo designado pela legislação como um regulador de acidez, além de desempenhar funções estabilizantes e sequestrantes.

### **Corante**

No que se refere à sua categorização, os corantes são divididos em: corante orgânico natural, extraído de vegetais ou, ocasionalmente, de animais, com o princípio corante isolado por meio de processos tecnológicos apropriados; corante orgânico sintético, produzido por síntese orgânica utilizando processos tecnológicos específicos; corante inorgânico, obtido a partir de substâncias minerais e sujeito a processos de elaboração e purificação adequados para uso em alimentos.

Na produção de bebidas energéticas, os corantes amplamente empregados são os corantes caramelos do tipo I e IV. A classificação desses corantes, conforme o Informe Técnico nº. 48,32 de 10 de abril de 2012, está relacionada aos

reagentes utilizados em sua produção. O caramelo tipo I é produzido com reagentes simples, enquanto o caramelo tipo IV utiliza sulfito de amônia durante o processo de fabricação.

### **Conservante**

Os conservantes mais utilizados e permitidos pela legislação brasileira em bebidas não alcoólicas incluem o ácido benzóico e seus sais de sódio, cálcio e potássio, com concentração máxima permitida de 0,05 g.(100 mL)-1; ácido sórbico e seus sais de sódio, potássio e cálcio, com concentração máxima permitida de 0,03 g.(100 mL)-1.

### **Antioxidantes**

Os antioxidantes são elementos indispensáveis na produção de bebidas energéticas, agindo como defesa contra os danos oxidativos causados pelo oxigênio reativo, incluindo radicais livres, que podem afetar lipídios, proteínas e ácidos nucleicos.<sup>33</sup> Esses compostos desempenham um papel crucial na estabilidade dos aromas, preservando o sabor e a cor dos produtos, o que resulta em uma extensão significativa da vida útil das bebidas energéticas.<sup>34</sup>

Na seleção dos antioxidantes para bebidas energéticas, são valorizadas propriedades como eficácia em baixas concentrações, compatibilidade com os ingredientes, estabilidade durante processamento e armazenamento, e a não toxicidade de seus produtos de oxidação.<sup>35</sup> Tanto os antioxidantes sintéticos, como hidroxianisol butilado (BHA) e hidroxitolueno butilado (BHT), quanto os naturais, como o ácido ascórbico (vitamina C), são empregados para proteger contra a oxidação, contribuindo assim para a qualidade e segurança das bebidas energéticas disponíveis no mercado.<sup>36</sup> É importante ressaltar que, quando utilizados para essa finalidade, esses antioxidantes não têm a função de conferir vitamina C à bebida, mas sim de proteger contra a deterioração causada pelo oxigênio.<sup>23</sup>

### **Taurina**

Outro componente comumente presente em bebidas energéticas é a taurina, um aminoácido intracelular mais abundante no organismo humano, embora sua produção comercial seja predominantemente sintética.<sup>37</sup> A quantidade recomendada de ingestão diária de taurina, estabelecida pela ANVISA, varia entre 40 e 400 mg para atender às necessidades nutricionais, com um limite máximo de 400 mg.(100 mL)-1 estabelecido para bebidas energéticas.<sup>38</sup> Estudos indicam que a taurina desempenha diversas funções fisiológicas, incluindo aceleração da excreção de substâncias prejudiciais, função

desintoxicante, melhora da contratilidade cardíaca e regeneração de membranas celulares para reduzir a fadiga muscular.<sup>39</sup>

Quanto ao seu efeito quando combinada com cafeína, a taurina intensifica a sensação de energia e aumenta o trabalho cardíaco, podendo potencializar os efeitos da cafeína na contração do músculo cardíaco, especialmente quando consumida em excesso durante atividades físicas intensas, podendo resultar em complicações cardiovasculares graves, como isquemia do miocárdio. Essas descobertas destacam a importância de monitorar o consumo desses compostos, especialmente quando combinados, para garantir a segurança dos consumidores de bebidas energéticas.<sup>40</sup>

### **Cafeína**

A cafeína (1,3,7-trimetilxantina) é um alcalóide natural encontrado em muitos produtos como grãos de café, folhas de chá, nozes de cola e grãos de cacau. Em comparação com a taurina, a cafeína está presente em menores quantidades no produto final, sendo que o limite máximo estabelecido pela ANVISA para bebidas energéticas é de 35 mg.(100 mL)-1.<sup>41</sup> Além disso, estudos indicam que indivíduos saudáveis devem limitar seu consumo diário de cafeína, com uma recomendação de até 400 mg ao dia para homens e 300 mg para mulheres.<sup>36</sup>

Os efeitos fisiológicos da cafeína incluem a estimulação do sistema nervoso central, do coração e dos músculos esqueléticos, podendo elevar a pressão arterial diastólica e sistólica. Seus efeitos colaterais incluem insônia, nervosismo, irritação gástrica, arritmia cardíaca, tremores e ansiedade.<sup>42</sup> Esses aspectos destacam a importância de compreender os efeitos da cafeína, especialmente em bebidas energéticas, onde seu consumo pode ser significativo.

### **Inositol**

O inositol é um composto encontrado em diversas fontes alimentares, incluindo frutas cítricas, lecitina de soja, grãos integrais e vísceras como fígado e coração.<sup>43</sup> Esse composto desempenha múltiplos papéis no organismo humano, participando do metabolismo de gorduras, auxiliando na redução do colesterol, facilitando a transmissão de impulsos nervosos e melhorando a memória. Além disso, é utilizado em suplementos esportivos devido ao seu potencial para aumentar a atenção e concentração, sendo também indicado para pacientes com diabetes.<sup>36</sup> A ingestão diária recomendada de inositol é de 500 a 1000 mg, com um limite máximo de adição em bebidas de 20 mg.(100 mL)-1.<sup>41</sup>

### **Glucoronolactona**

A glucoronolactona, presente em certas bebidas energéticas, é um metabólito natural do corpo humano formado a partir da glicose, encontrado também em alimentos como vinho tinto, cereais, maçãs e pêras.<sup>38</sup> Estudos sugerem que a glucoronolactona pode melhorar a memória, concentração e atuar como antidepressivo e estimulante, reduzindo a sonolência.<sup>36</sup> As marcas comerciais variam na quantidade desse composto, com limites de adição respeitando o máximo de 250 mg/100 mL estabelecido pela ANVISA.<sup>41</sup>

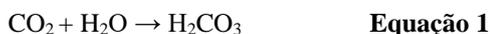
### **Carbonatação**

A gaseificação, também conhecida como carbonatação, é um processo muito utilizado na Indústria alimentícia desde o final do século 18, quando Joseph Priestley adicionou dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em água e inventou a primeira água gaseificada e, após Tobern Bergman criar um sistema de produção dessa bebida, Jacob Schweppes otimizou esse sistema de produção com alcance em escala comercial e fundou a empresa Schweppes, reconhecida mundialmente pela produção de bebidas carbonatadas.<sup>9</sup> Atualmente, a empresa diversificou e inovou seus produtos, com a produção da água gaseificada, mas também de água tônica e refrigerantes.<sup>44</sup>

A indústria de bebidas tem grande importância na economia brasileira, em 2019 o faturamento anual do setor correspondeu a cerca de 1,9% do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro. Dentre as empresas com maior volume de vendas no mercado brasileiro de bebidas, destacam-se a The Coca Cola company, com marcas como a Coca-cola, Fanta e Kuat, a Anheuser-Busch Inbev, com a marca Antártica, e o Grupo Edson Queiroz, com a marca Indaiá. A produção de bebidas carbonatadas tem grande destaque no cenário brasileiro e, entre aquelas não alcoólicas, as bebidas energéticas contribuem de forma significativa com o faturamento dessa indústria.<sup>45</sup> De acordo com a ABIR, em 2021, no mercado brasileiro de bebidas energéticas, o volume produzido foi de 185.246 mil litros e, no mesmo ano, o consumo por pessoa foi de 0,87 litros por habitante.<sup>46</sup>

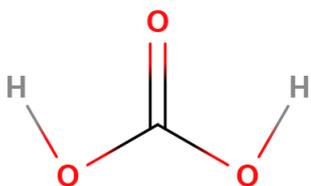
A carbonatação pode ocorrer tanto naturalmente quanto artificialmente e consiste na adição e dissolução de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Em um processo industrial, essa adição ocorre em água líquida ou na mistura de xarope composto, em um processo controlado a baixas temperaturas e alta pressão.<sup>9</sup> Quando o CO<sub>2</sub> é adicionado em água em um processo de carbonatação, há a formação de ácido carbônico. Em um recipiente apropriado e fechado, o sistema entrará em

equilíbrio, de forma que a quantidade de dióxido de carbono reagindo com a água se mantenha igual a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada. Caso ocorra alguma perturbação nesse sistema, como a despressurização dele, é possível observar bolhas de dióxido de carbono na superfície do líquido, isso ocorre pois a redução da pressão afeta na dissolução do CO<sub>2</sub> em água, conforme mostra a equação 1.<sup>47</sup>



A escolha do dióxido de carbono para a gaseificação de bebidas inclui tanto aspectos químicos quanto sensoriais. O CO<sub>2</sub> é encontrado no estado de gás na CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão), é incolor, insípido, não tóxico e inerte, em outros valores de temperatura e pressão, ele pode ser encontrado também nos estados sólido e líquido. O CO<sub>2</sub> pode ser dissolvido em líquidos, tais como a água, e essa dissolução é maior em baixas temperaturas e altas pressões.<sup>47</sup> A carbonatação em água e formação do ácido carbônico possui diversas características atrativas para os consumidores, tais como a efervescência, acerbidade e o realce da percepção gustativa, além de saciar a sede e aumentar a refrescância das bebidas. Outro aspecto importante é que a gaseificação de água com CO<sub>2</sub> contribui na vida útil e na segurança alimentar da bebida pois dificulta a proliferação de bactérias, bolores e leveduras, uma vez que a formação do ácido carbônico contribui para a diminuição do pH da bebida e, portanto, para a sua acidez, o que transforma o produto em um ambiente com condições hostis para a proliferação e sobrevivência da maioria desses microrganismos,<sup>48</sup> além de restringir a disponibilidade de oxigênio necessária para a respiração celular e consequente sobrevivência desses organismos microscópicos. Quanto aos aspectos econômicos, o gás dióxido de carbono é abundante, de fácil aquisição e liquefação, e de baixo custo.<sup>9</sup>

**Figura 1.** Representação bidimensional da estrutura molecular do ácido carbônico.



A concentração de dióxido de carbono pode variar de acordo com as características da bebida e do sistema de produção. De forma geral, em bebidas de cola a concentração do a concentração de CO<sub>2</sub> é de cerca de 3.5 g por volume e, nas bebidas frutadas, essa concentração é reduzida. Apesar da

variação nessa concentração, o máximo de dióxido de carbono que pode ser dissolvido em água é 8 g por litro.<sup>9</sup>

O sistema simples de gaseificação ocorre de forma contínua e possui uma bomba de alimentação, um injetor, um tanque de carbonatação e uma bomba de dosagem. Durante o processo, a água ou o xarope entra no tanque de carbonatação, que está pressurizado, por meio da bomba de alimentação.<sup>49</sup> No tanque, o dióxido de carbono é injetado e dissolvido no líquido a alta pressão e baixa temperatura e, após um período de tempo, o sistema entra em equilíbrio. A bebida gaseificada sai do sistema por meio da bomba de dosagem. Em um sistema mais complexo, outras etapas são adicionadas ao processo, tais como uma bomba de vácuo e um tanque de desaeração, que juntos são responsáveis por retirar o ar da água antes do processo de carbonatação.<sup>47</sup>

## Envase

Durante o processo de produção de uma bebida carbonatada, o envase está entre as últimas etapas e consiste no enchimento do recipiente com o produto e na preparação e escolha da embalagem em que ocorrerá o envasamento, de forma que esse armazenamento mantenha a qualidade do produto, mas que também tenha um baixo custo. Para a adição da bebida gaseificada na embalagem, é utilizada uma máquina de enchimento por contrapressão, esse equipamento é muito utilizado na indústria de bebidas para impedir a liberação de CO<sub>2</sub> do produto líquido. Durante esse processo, é necessário garantir que a temperatura permaneça baixa e que a pressão permaneça elevada.<sup>49</sup>

Inicialmente ocorrem dois processos com uma válvula de vácuo pneumática, ambos buscam reduzir a quantidade de ar presente no recipiente. Após essa etapa, a garrafa em que o líquido será inserido é preenchida com um gás para que durante o enchimento da embalagem, este gás saia do recipiente conforme o líquido entre para que ocorra o armazenamento sem a perda de CO<sub>2</sub>, ou com esta perda reduzida. Por fim, há o procedimento para corrigir a quantidade de bebida inserida, em que é adicionado o CO<sub>2</sub> em uma pressão maior que a pressão do líquido, assim o excesso do produto volta para o equipamento.<sup>49</sup>

Outro fator importante do processo de envase é a escolha do material do recipiente, que deve manter as características químicas e sensoriais do produto, como sua aparência, gosto, valor nutricional, a gaseificação, no caso das bebidas carbonatadas, e a resistência a alta pressão interna no interior da garrafa. Outros aspectos significativos são a

estabilidade, fragilidade e durabilidade do material. Com a modernização do processo produtivo e o aumento das discussões ambientais, a biodegradabilidade e reciclagem do material também é considerada em muitas empresas, ainda que não seja um fator definitivo.<sup>50</sup>

Os materiais de embalagens mais utilizados na indústria são o plástico, o alumínio e o vidro. O alumínio tem como vantagens a facilidade de abertura, a condutividade térmica, que possibilita uma maior rapidez de resfriamento da bebida, a facilidade de impressão de artes e a resistência do material, além de possuir uma barreira eficaz que impede a saída de CO<sub>2</sub> do recipiente. As desvantagens da utilização do alumínio são a interferência que pode ocorrer no gosto da bebida e o fechamento da embalagem, que não pode ocorrer novamente uma vez que foi aberta. O politereftalato de etileno (PET) é um tipo de plástico e tem como vantagens seu baixo custo de produção, sua resistência e transparência, como desvantagens, possui uma baixa validade e uma barreira ineficaz na retenção do dióxido de carbono a alta pressão dentro do recipiente, principalmente se comparado ao alumínio e ao vidro. O vidro possui como vantagens a qualidade na manutenção das características do produto, principalmente devido a sua eficiente barreira que retém o CO<sub>2</sub> na embalagem, o que mantém a efervescência, sabor e atratividade do produto.<sup>50</sup>

O alumínio é o material recomendado quando a empresa busca um material com preço acessível, mas que mantenha a qualidade e as características da bebida gaseificada com uma eficácia significativa. O vidro é o mais recomendado quando a empresa busca uma maior qualidade e manutenção dos aspectos do seu produto, como o sabor e a concentração de dióxido de carbono dissolvido, que mantém a efervescência da bebida. As embalagens feitas de plástico são recomendadas no caso em que a empresa busca um material mais barato e de fácil abertura e manuseamento.<sup>50</sup>

## Rotulagem

Com relação a rotulagem, é importante ressaltar que compostos classificados como líquido pronto para o consumo devem indicar as quantidades de cafeína, taurina, inositol e glucoronolactona por porção do produto na lista de ingredientes. Assim, como descrito pela Resolução de Diretoria Colegiada RDC N° 719, os limites máximos para alguns componentes presentes nas bebidas energéticas estão dispostos na tabela 3.

**Tabela 3.** Limites máximos de adição dos principais componentes de uma bebida energética por produto.

<b>Ingrediente</b>	<b>Limite máximo de adição por produto</b>
Inositol	máximo 20 mg.(100 mL)-1
Glucoronolactona	máximo 250 mg.(100 mL)-1
Taurina	máximo 400 mg.(100 mL)-1
Cafeína	máximo 35 mg.(100 mL)-1

Devido ao produto conter restrições de saúde para alguns grupos de pessoas, a RDC N° 719 também aponta a obrigatoriedade do produto conter as seguintes advertências, em destaque e em negrito “Crianças, gestantes, nutrízes, idosos e portadores de enfermidades: consultar o médico antes de consumir o produto” e “Não é recomendado o consumo de bebida alcoólica”. O artigo 7° também aponta que na rotulagem é o uso das expressões “estimulante”, “potencializador”, “melhora de desempenho” ou frases equivalentes, inclusive em outros idiomas.

Em caso de adição de aditivo alimentar aromatizado, é exigido que este seja indicado na embalagem do produto. Dessa forma, ela deve vir incluída da expressão “sabor ...” ou “sabor artificial ...”, seguido do nome do aroma.

## Conclusões

Ao examinar as referências da pesquisa subjacente a este artigo, observou-se a metodologia de produção de bebidas energéticas, a qual, mesmo fundamentada por um fluxo linear de fabricação, visualizado na Figura 1, revela uma riqueza de complexidade informacional em seus procedimentos e componentes. Impressionando pela velocidade e qualidade dos procedimentos industriais conduzidos por profissionais da área, dada a alta demanda. Como discutido anteriormente, a ABIR relatou no ano de 2021 um volume de produção de 185.246 mil litros no mercado brasileiro de energéticos.<sup>46</sup>

A base essencial do processo de produção de bebidas energéticas é o xarope simples, que se trata de uma solução aquosa de açúcar crucial para a formulação dessas bebidas,

essa calda passa por procedimentos como a dissolução, clarificação e filtração para assim compor a produção do xarope composto, a qual é o foco da fiscalização de todo o processo. No Brasil, a ANVISA estabelece limites para as quantidades dos aditivos a serem adicionados, sendo os principais e mais populares a Taurina e a Cafeína, que têm diversas funções fisiológicas, como a redução da fadiga muscular e estimulação dos músculos esqueléticos, respectivamente.

O Xarope, seguindo procedimentos análogos aos encontrados na fabricação de refrigerantes, passa então para gaseificação ou carbonatação. Nesse processo, as características sensoriais familiares como a efervescência e o realce da percepção gustativa, são alcançadas através da dissolução do CO<sub>2</sub>. Fato esse que atenua a fundamentalidade do uso de alguns compostos químicos para produtos diariamente consumidos pela população.

Por fim, esse material entra na linha de envasamento e posteriormente preenchido em latas por enchedores, marcando o processo final da produção para que esse possa ser estocado, fiscalizado e levado para venda em mercados, quando o produto se encontra conforme a Resolução de Diretoria Colegiada RDC N° 719.

## Contribuições por Autor

Todos os autores se responsabilizaram pela pesquisa e seleção de artigos que embasaram as partes pelas quais foram responsáveis. A autora Linara T. D. Corrêa concentrou seus esforços na pesquisa e escrita sobre as legislações vigentes que regem a produção de bebidas energéticas, além dos equipamentos necessários ao processo. A autora Luiza P. F. de Souza ficou responsável pela elaboração da introdução, além de checar possíveis conflitos de interesses e organizar de maneira sistemática as referências bibliográficas. O autor Paulo R. Neto foi responsável pela redação do *abstract* e resumo, além da escrita da metodologia de pesquisa e da formulação da conclusão com os resultados principais. O autor Pedro Paulo S. M. Pinto contribuiu para as seções relacionadas à produção de xaropes simples e compostos, e também para a seção de aditivos. A autora Victoria P. Silva foi responsável pela escrita das partes sobre carbonatação e envase, concluindo o desenvolvimento do nosso artigo. Por fim, a Linara T. D. Corrêa fez a revisão final das informações.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 Agência Nacional de Vigilância Sanitária, Resolução RDC n° 719, Regulamento Técnico para Misturas para o Preparo de Alimentos e Alimentos Prontos Para o Consumo, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2022, [https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC\\_719\\_2022\\_.pdf/e5e3f78b-83d8-4d59-8213-81685c74d0be](https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC_719_2022_.pdf/e5e3f78b-83d8-4d59-8213-81685c74d0be)
- 2 ENERGÉTICOS, <https://abir.org.br/o-setor/bebidas/energeticos/>, (acessado 17 de março de 2024).
- 3 J. M. D. Carvalho, G. A. Maia, P. H. M. D. Sousa and S. Rodrigues, Perfil dos principais componentes em bebidas energéticas: cafeína, taurina, guaraná e glucoronolactona, *Rev Inst Adolfo Lutz*, 2006, **65**, 78–85.
- 4 A. R. Jagim, P. S. Harty, G. M. Tinsley, C. M. Kerkick, A. M. Gonzalez, R. B. Kreider, S. M. Arent, R. Jager, A. E. Smith-Ryan, J. R. Stout, B. I. Campbell, T. VanDusseldorp and J. Antonio, International society of sports nutrition position stand: energy drinks and energy shots, *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2023, **20**, 2171314.
- 5 J. L. Temple, C. Bernard, S. E. Lipshultz, J. D. Czachor and J. A. Westphal, The Safety of Ingested Caffeine: A Comprehensive Review, *Front. Psychiatry*, DOI:10.3389/fpsyt.2017.00080.
- 6 M. El Moheb and M. M. Refaat, The impact of caffeine and taurine on ventricular arrhythmias, *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, 2022, **33**, 1298–1299.

- 7 C. Ellermann, T. Hakenes, J. Wolfes, F. K. Wegner, K. Willy, P. Leitz, B. Rath, L. Eckardt and G. Frommeyer, Cardiovascular risk of energy drinks: Caffeine and taurine facilitate ventricular arrhythmias in a sensitive whole-heart model, *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, 2022, **33**, 1290–1297.
- 8 C. Krittanawong, Y. K. Qadeer, Z. Wang, K. Nadolsky, S. Virani and C. J. Lavie, Sugar-Sweetened and Artificially Sweetened Beverages Consumption and Risk of Cardiovascular Health, *The American Journal of Medicine*, 2023, **136**, 163–171.
- 9 C. M. Galanakis, Ed.1, Trends in non-alcoholic beverages, Academic Press, London, United Kingdom ; San Diego, CA, United States, 2020.
- 10 A. Ehlers, G. Marakis, A. Lampen and K. I. Hirsch-Ernst, Risk assessment of energy drinks with focus on cardiovascular parameters and energy drink consumption in Europe, *Food and Chemical Toxicology*, 2019, **130**, 109–121.
- 11 L. C. Tamamoto, S. J. Schmidt and S. Lee, Sensory Profile of a Model Energy Drink with Varying Levels of Functional Ingredients—Caffeine, Ginseng, and Taurine, *Journal of Food Science*, 2010,**25**,S271–S27.
- 12 A. Reddy, D. F. Norris, S. S. Momeni, B. Waldo and J. D. Ruby, The pH of beverages in the United States, *The Journal of the American Dental Association*, 2016, **147**, 255–263.
- 13 *Bebidas Alcoólicas: Ciência E Tecnologia: Vol.1*, Editora Edgard Blucher, 2022.
- 14 53° Congresso Brasileiro de Química: 53° CBQ, Abq, 2013.
- 15 L. A. Silva, J. B. De Andrade, W. A. Lopes, L. S. Carvalho and P. A. P. Pereira, Solubilidade e reatividade de gases, *Química Nova*, 2017, **40**, DOI:10.21577/0100-4042.20170034.
- 16 M. S. Santos, F. de M. Ribeiro, Cervejas e Refrigerantes, *CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental*, 2005.
- 17 M. C. M. Ferreira, SISTEMAS DE QUALIDADE NA PRODUÇÃO DE REFRIGERANTES COM BASE NA SATISFAÇÃO DE CONSUMIDORES, Programa de pós graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e Uniminas <http://186.202.79.107/download/sistemas-de-qualidade-na-producao-de-refrigerantes.pdf>
- 18 Ministério de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Portaria n°. 544, Fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade, para refresco, refrigerante, preparado ou concentrado líquido para refresco ou refrigerante, preparado sólido para refresco, xarope e chá pronto para o consumo, 1998.
- 19 K. A. Clauson, K. M. Shields, C. E. McQueen and N. Persad, Safety issues associated with commercially available energy drinks, *Journal of the American Pharmacists Association*, 2008, **48**.
- 20 Ministério da Saúde, portaria n° 2914, Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2011, [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)
- 21 Ministério de Estado da Agricultura e do Abastecimento, instrução normativa n° 17, Regulamentos Técnicos para Fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade, para refresco, refrigerante, preparado ou concentrado líquido para refresco ou refrigerante, preparado sólido para refresco, xarope e chá pronto para o consumo, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2013, <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-animais/plano-de-nacional-de-controle-de-residuos-e-contaminantes/documentos-da-pncrc/pncrc-2013.pdf>
- 22 P. K. R. Vieira, ELABORAÇÃO DE ENERGÉTICO SABOR TAPEREBÁ, Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, 2019.

- 23 A. C. da S. Lima and J. C. Afonso, A química do refrigerante, *Química Nova na Escola*, 2009, **31**, 210–215.
- 24 M. M. A, AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA NA PRODUÇÃO DE BEBIDAS ENERGÉTICAS, Trabalho de Conclusão de Curso pela Universidade Estadual de Goiás, 2012.
- 25 Agência Nacional de Vigilância Sanitária, Resolução RDC nº 719, Regulamento Técnico para Misturas para o Preparo de Alimentos e Alimentos Prontos Para o Consumo, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2022, [https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC\\_719\\_2022\\_.pdf/e5e3f78b-83d8-4d59-8213-81685c74d0be](https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC_719_2022_.pdf/e5e3f78b-83d8-4d59-8213-81685c74d0be)
- 26 Secretaria de Vigilância Sanitária, portaria nº 540, Regulamento Técnico Aditivos Alimentares, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1997, [https://bvsm.s.saude.gov.br/bvs/saudelegis/svs/1/1997/prt0540\\_27\\_10\\_1997.html](https://bvsm.s.saude.gov.br/bvs/saudelegis/svs/1/1997/prt0540_27_10_1997.html)
- 27 Secretaria de Vigilância Sanitária, Resolução RDC nº 5, Regulamento Técnico para Atribuição de Aditivos e seus Limites Máximos para a Categoria de Alimentos 16.2: Bebidas Não Alcoólicas, Subcategoria 16.2.2: Bebidas Não Alcoólicas Gaseificadas e Não Gaseificadas, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2007, [https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC\\_05\\_2007\\_COMP.pdf/39e3737d-a1f5-49e6-84a1-c60f8475c1f7](https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC_05_2007_COMP.pdf/39e3737d-a1f5-49e6-84a1-c60f8475c1f7)
- 28 Agência Nacional de Vigilância Sanitária e Ministério da Saúde, Resolução RDC nº 2, Regulamento Técnico sobre Aditivos Aromatizantes, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2007,
- 29 P. G. Palha, Tecnologia de refrigerantes. Rio de Janeiro: AmBev, 2005.
- 30 Ácido Cítrico ou Citrato de Hidrogênio, *ADITIVOS & INGREDIENTES*, 2014, **112**, 31-35, [http://www.insumos.com.br/aditivos\\_e\\_ingredientes/materias/268.pdf](http://www.insumos.com.br/aditivos_e_ingredientes/materias/268.pdf)
- 31 A. L. P. P. et al, Aditivos alimentares: conceitos, aplicações e toxicidade, Fucamp, 2013.
- 32 Agência Nacional de Vigilância Sanitária, Informe Técnico nº. 48, Esclarecimentos sobre a segurança de uso do corante Caramelo IV – processo sulfito amônia (INS 150d), Brasília, DF, 2012, [https://antigo.anvisa.gov.br/resultado-de-busca?p\\_p\\_id=101&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&\\_101\\_struts\\_action=%2Fasset\\_publisher%2Fview\\_content&\\_101\\_assetEntryId=388747&\\_101\\_type=document](https://antigo.anvisa.gov.br/resultado-de-busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=388747&_101_type=document)
- 33 C. V. de M. B. Pimentel, V. M. Francki, A. P. B. Gollucke, *Alimentos funcionais: introdução às principais substâncias bioativas em alimentos*, Editora Varela, 2005.
- 34 W. G. F. Venturini, *Bebidas não alcoólicas: ciência e tecnologia*, Editora Edgard Blucher, 2022.
- 35 V. C. Ramalho, N. Jorge, Antioxidantes utilizados em óleos, gorduras e alimentos gordurosos, *Química Nova*, 2006, **29**, 755-760.
- 36 D. Maioli, Caracterização físico-química e sensorial de bebida energética durante o armazenamento, Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- 37 R. Seidl, A. Peyrl, R. Nicham, E. Hauser, A taurine and caffeine-containing drink stimulates cognitive performance and well-being, *Amino Acids*, 2000, **19**, 635 – 642.
- 38 D. Finnegan, The health effects of stimulant drinks. *Nutrition Bulletin*, 2003, **28**, 147 – 155.
- 39 G. N. K. Fujisaka, Efeitos de etanol e bebida energética no padrão de sono e na atividade motora de camundongos, Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Psicobiologia, Universidade Federal de São Paulo, 2009.
- 40 A. J. Berger, K. Alford, Cardiac arrest in a young man following excess consumption of caffeinated "energy

- drinks", *The Medical journal of Australia*, 2009, **190**, 41-43.
- 41 Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 269, Regulamento Técnico Sobre a Ingestão Diária Recomendada (IDR) de Proteína, Vitaminas e Minerais, Ministério da Saúde, Brasília, DF, 2005, [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0269\\_22\\_09\\_2005.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0269_22_09_2005.html)
- 42 J. D. Stookey, The diuretic effects of alcohol and caffeine and total water intake misclassification, *European Journal of Epidemiology*, 1999, **15**, 181 – 188.
- 43 T. DALL'AGNOL, Influência do Inositol em Praticantes de Atividade, 2008. <http://www.ativo.com/nutricao/influencia-do-inositol-em-praticantes-de-atividade-fisica/>, (acesado em 19 de março de 2024).
- 44 SCHWEPPE'S PRODUCTS, <https://www.schweppes.com/products>, (acesado 19 de março de 2024).
- 45 INDÚSTRIA DE BEBIDAS NÃO ALCOÓLICAS, [https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/330/3/2020\\_CDS\\_120.pdf](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/330/3/2020_CDS_120.pdf), (acesado 19 de março de 2024).
- 46 Energéticos, <https://abir.org.br/otorsetor/dados/energeticos/>, (acesado 19 de março de 2024).
- 47 D. P. Steen and P. R. Ashurst, Eds., *Carbonated Soft Drinks: Formulation and Manufacture*, Wiley, 1st edn., 2006.
- 48 M. R. Ravindra, K. J. Rao, B. S. Nath and C. Ram, Extended shelf life flavoured dairy drink using dissolved carbon dioxide, *Journal of Food Science and Technology*, 2014, **51**, 130–135.
- 49 C. Madonia and D. N. Logho, Modelling The Filling of Carbonated Soft Drinks, Laurea Magistrale in Food Engineering, scuola ingegneria industriale e dell'informazione, 2021.
- 50 N. A. Mohamed, Evaluation of the Functional Performance for Carbonated Beverage Packaging: A Review for Future Trends, *International Institute for Science, Technology and Education*, 2016, **39**, 53–61.

# Uma revisão sobre o uso de adições minerais no cimento portland e suas vantagens

DOI: 10.5281/zenodo.11092692

Eliardo da Silva Pinheiro Luz<sup>a\*</sup>, Júlia Rezende Vargas<sup>a</sup>, Bárbara Emília Ribeiro Alcântara<sup>a</sup> e Vinícius Neibert Bezerra<sup>a</sup>

This review article aims to compile and present the various types of mineral additions in Portland cement. Considering the high environmental impact of the cement industry, mineral additions have emerged as a possible way to reduce the amount of CO<sub>2</sub> emitted per kilogram of Portland cement by replacing your main components. Exploring the types of cement, additives, and mineral additions, the physical and chemical properties that make them so attractive to the cement industry have been highlighted.

Este artigo de revisão busca compilar e apresentar as diversas formas de adições minerais em cimentos Portland. Tendo em vista o alto impacto ambiental da indústria de cimento, as adições minerais surgiram como uma possível maneira de diminuir a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por quilo de cimento Portland por meio da substituição de seus componentes principais. Explorando os tipos de cimentos, aditivos e adições minerais, foram destacadas as propriedades físico-químicas que os tornam tão atraentes para a indústria cimenteira.

<sup>a</sup> Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB), Brasília, Distrito Federal, Brasil.

\*E-mail correspondente: eliardoluz@gmail.com

**Palavras-chave:** Cimento Portland; Indústria Cimenteira; Adições Minerais; Sustentabilidade.

Aceito em 19 de março de 2024,

Aprovado em 26 de abril de 2024,

Publicado em 01 de maio de 2024.

## Introdução

O cimento desempenha um papel fundamental na infraestrutura mundial, sendo extensivamente utilizado na construção civil e integrando desde estradas, barragens e pontes até os maiores arranha-céus. A indústria do cimento, porém, está longe da estagnação, sendo impulsionada por demandas cada vez maiores por infraestrutura e desenvolvimento tecnológico,<sup>1,2</sup> que visa, entre outras premissas, reduzir os impactos ambientais ocasionados por este material e o esgotamento de recursos naturais não renováveis.<sup>3</sup> Diante disso, busca-se examinar os processos de produção existentes, a atual indústria cimenteira e identificar alternativas sustentáveis para suprir as necessidades da construção civil atual e futura. Essa revisão busca, portanto, explorar alguns dos avanços recentes da indústria do cimento, examinar o impacto ambiental associado e discutir o uso de adições minerais como uma das possíveis abordagens para o aumento da sustentabilidade do cimento.

O cimento pode ser entendido como um material aglomerante ativo e hidráulico,<sup>4</sup> que passa a apresentar alta resistência mecânica após sofrer processos contínuos de cristalização.<sup>5,6</sup> Apesar de ser comum usar como referência o Cimento Portland Comum (CPI e CPI-S), existem outros tipos

de cimento, cada um com aplicações específicas, a saber: Cimento Portland Composto (CP II); Cimento Portland de Alto-Forno (CP III); Cimento Portland Pozolânico (CP IV); Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI); e Cimento Portland Branco (CPB).<sup>5</sup> No Brasil, todas as especificações de cimentos são atualmente regidas pela “NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos”.<sup>7</sup>

A produção de cimento deve obedecer combinações químicas controladas de cálcio, silício, alumínio, ferro e demais segredos industriais, mas, via de regra, pode ser feita a partir de variadas matérias-primas, como calcário, conchas e muitos outros. Ao serem submetidos a altas temperaturas, esses materiais se aglomeram e são então transformados no pó fino que conhecemos.<sup>8</sup> Existem variadas formas de se produzir cimento, mas o método mais utilizado é chamado “método seco”, em que primeiro se extrai as matérias-primas necessárias, como, mas não exclusivamente, calcário e argila, que passam então por sucessivos processos de britagem e trituração antes de serem combinadas com minério de ferro ou cinzas volantes (cinzas de textura mais fina arrastadas por gases de combustão de fornalhas e abatidas por precipitadores eletrostáticos<sup>9</sup>) e a mistura ser disposta em fornos de cimento que chegam até aproximadamente 1500 °C.

Importante ressaltar que ao longo do processo, gases, principalmente CO<sub>2</sub>, são expelidos e o material resultante, com aspecto semelhante a carvão, é denominado clínquer, que passa então por resfriamento antes de ser triturado e misturado, respeitadas as proporções estipuladas na legislação, com gesso e calcário para dar origem ao cimento comercializado. O processo de produção por via úmida produz produtos com características físico-químicas semelhantes e a grande diferença para o método seco é que as matérias-primas são umedecidas com uma pasta de argila e água antes de serem alimentadas ao forno.<sup>8</sup>

Para a fabricação de cada tipo de cimento citado anteriormente, são adicionados ingredientes especiais. Para a produção do tipo CP II, por exemplo, pode ser adicionado separadamente escória (CP II-E), Pozolana (CP II-Z) ou Filler (CP II-F). Para as especificações de cada um dos tipos de cimentos, é necessário a observância da NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos.<sup>7</sup>

Como anteriormente citado, o cimento é um material amplamente utilizado na construção civil e para que seja possível a sua aplicação em diversos contextos, com necessidades mecânicas e químicas específicas, difunde-se o uso de aditivos, ou seja, substâncias que são adicionadas intencionalmente ao cimento no processo de transformação a concreto, a fim de melhorar ou reforçar características desejadas.<sup>10</sup> São usualmente, mas não exclusivamente, utilizados como aditivos: tensoativos (como plastificantes e redutores de água), incorporadores de ar, aceleradores de pega, retardadores de pega, impermeabilizantes, produtores de gás ou espuma, fungicidas, germicidas, inseticidas, inibidores de corrosão de armaduras.<sup>11</sup>

Para além dos aditivos, há ainda as adições, que têm o objetivo de somar ou substituir parcialmente o cimento, graças às propriedades semelhantes às do cimento. Dessa forma, enquanto os aditivos buscam acentuar certas propriedades, as adições geralmente buscam alterar a proporção da composição do concreto, porém também são utilizadas para alterar as propriedades estruturais ou físico-químicas do cimento.<sup>11</sup> O objetivo principal das adições é, portanto, reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de cimento pelo uso de materiais alternativos<sup>12,13</sup>. As adições minerais podem ser classificadas em materiais pozolânicos, cimentantes e filler.<sup>11</sup> Em muitos casos, os materiais utilizados como adições minerais são subprodutos de outras indústrias,<sup>14</sup> portanto, a atuação se aproxima de uma tentativa de implementação de economia circular.

Pozolânicos são materiais artificiais ou naturais silicosos ou sílico-aluminosos que possuem pouca ou nenhuma capacidade cimentante, mas que geram materiais com essas propriedades na presença de água e hidróxido de cálcio.<sup>11,12</sup> São usados no intuito de reduzir problemas ambientais associados à produção de cimento, como a grande quantidade de matéria-prima e a quantidade de gases estufas gerados durante a produção do clínquer.<sup>12</sup> São alguns exemplos de materiais pozolânicos argilas calcinadas ou termicamente ativadas, escória de cobre, manganês e níquel, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar.<sup>11,12</sup>

Cimentantes são substâncias capazes de gerar produtos cimentantes sem a presença de hidróxido de cálcio, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e escória granulada de alto forno.<sup>11,14</sup> Fillers são materiais sem atividade química, que atuam no efeito de empacotamento granulométrico do cimento e na nucleação para a hidratação do material. São exemplos de filler: calcário, pó de quartzo e pó de pedra.<sup>11</sup>

## Metodologia

Os estudos utilizados nesta revisão foram selecionados de acordo com a relevância em relação à temática avaliada. Foram aplicados critérios de exclusão, evitando periódicos com baixo fator de impacto, para evitar a inclusão de estudos com baixa qualidade metodológica ou que não contribuíssem para com os objetivos da presente revisão. A busca literária foi realizada utilizando bases de dados eletrônicas, como o Portal de Periódicos da CAPES, Web of Science e Scielo. A busca foi restrita a estudos publicados em português e inglês, sem limitação de ano de publicação.

## Resultados e discussão

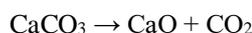
### Química do cimento

Para desenvolver uma análise dos efeitos que as adições minerais podem gerar no cimento Portland, é necessário compreender qual papel tomariam no processo e como comporiam quimicamente o produto final com as propriedades desejadas. Os efeitos causados por esses compostos no produto final são advindos da interação dessas substâncias durante o processo de hidratação. Desse modo, é preciso compreender a química do cimento primeiramente, analisando as principais reações químicas e físicas no processo do cimento para posteriormente desenvolver um entendimento dos mecanismos de atuação das adições minerais.<sup>15</sup>

Entre os componentes necessários para o processo, têm-se alguns óxidos, como o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), o óxido

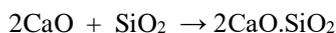
de ferro (III) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e o óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que podem ser extraídos da argila, uma matéria-prima com constituição de baixa granulometria rica em argilominerais, como os silicatos de cálcio, ferro, alumínio, magnésio e potássio. Além disso, utiliza-se o calcário, uma rocha sedimentar com grande composição de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), que em elevadas temperaturas forma o óxido de cálcio (CaO), substância utilizada no processo do cimento, tendo também emissão de CO<sub>2</sub>.<sup>16</sup>

Nessa perspectiva, após a devida extração e moagem da matéria-prima, o processo de clínquerização é iniciado, onde seqüências de reações físicas e químicas ocorrem em fornos rotatórios. As reações químicas já se iniciam antes da entrada no forno, durante o pré-aquecimento do calcário, onde ocorre a decomposição a uma temperatura de cerca de 840°C do principal constituinte do calcário, o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), que é decomposto à CO<sub>2</sub> e CaO pela reação abaixo.<sup>16</sup>



Esse processo é completado no interior do forno. A formação do óxido de cálcio é essencial para as reações seguintes, pois reage com os óxidos advindos da argila para gerar os principais compostos para as reações seguintes, o silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S), o silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), o aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) e o ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF).<sup>17</sup>

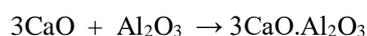
O composto C<sub>2</sub>S tem como principal papel oferecer uma maior resistência mecânica a longo prazo ao cimento. A reação química para formar o silicato dicálcico inicia-se em temperaturas próximas a 900°C e segue a seguinte equação.<sup>18</sup>



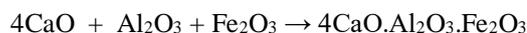
O silicato tricálcico a ser formado, de fórmula (CaO)<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub>, tem por principais funções promover o endurecimento e resistência do cimento e acelerar o processo de hidratação. O C<sub>3</sub>S é formado em temperaturas de 1200°C a 1300°C a partir da reação química abaixo.<sup>19</sup>



Para o caso do composto C<sub>3</sub>A, há maior formação em condições úmidas durante a etapa de resfriamento, tendo maior composição em cimentos aluminosos. A síntese do aluminato tricálcico ocorre a cerca de 1100°C no forno com a seguinte equação química.<sup>18</sup>



Por último, o ferroaluminato tetracálcico, de fórmula 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, oferece ao produto final uma maior resistência à corrosão química e a cor típica acizentada do cimento. A formação do C<sub>4</sub>AF ocorre em temperaturas entre 1100°C e 1250°C, pela reação abaixo.<sup>18</sup>



Para melhor compreensão, na tabela abaixo é apresentada a composição química de um cimento Portland tipo II, onde é observada a essencialidade dos principais compostos citados na composição dos cimentos.

**Tabela 1.** Composição química de um cimento Portland tipo II. Extraído da referência <sup>20</sup>.

Composto	Peso (%)
Silicato dicálcico (C <sub>2</sub> S)	42
Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)	32
Aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A)	6
Ferroaluminato tetracálcico (C <sub>4</sub> AF)	12

É importante ressaltar também que há outros produtos secundários formados no interior do forno, como o sulfossilicato de cálcio, sulfato de cálcio e 2Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>.CaSO<sub>4</sub>.<sup>15</sup>

O resultado de todo o processo de clínquerização é o clínquer, um material granulado obtido após seu devido resfriamento que possui dimensões entre 2 a 20 mm de diâmetro. Após a obtenção do clínquer, adiciona-se o sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>), que atua como um retardador da pega, e os materiais são moídos para se obter a granulometria desejada. Para o caso do cimento Portland comum (CP I) puro, não se adiciona outra substância à exceção do sulfato de cálcio, o que serve como um comparativo para analisar os efeitos que as adições minerais podem causar no produto final. Assim, prossegue-se o processo a partir da adição apenas do CaSO<sub>4</sub> ao clínquer.<sup>16</sup>

A próxima etapa a ser analisada é a hidratação, processo de mistura do cimento com água que gera mudanças químicas e físico-mecânicas profundas no produto, sendo fundamental para a cura e endurecimento do cimento. A

hidratação é caracterizada por uma série de reações químicas exotérmicas que se iniciam ao contato imediato com a água. As reações produzem hidratos do cimento nas superfícies das partículas que gradativamente crescem, alastram-se, entrelaçam-se e aderem a superfícies adjacentes. Os principais fatores que afetam essa etapa, desconsiderando o uso das adições minerais, são a proporção de água e cimento, a granulometria, a composição do cimento e a temperatura da cura.<sup>19</sup>

A hidratação pode ser simplificada em 4 etapas, sendo a primeira caracterizada por um rápido e pequeno aumento de temperatura, a segunda uma fase de dormência, onde não ocorre aumento na temperatura, a terceira uma etapa de rápido aumento de temperatura e a quarta uma fase em que se reduz gradativamente a liberação de calor.<sup>21</sup>

Na primeira etapa, há a reação de ambos  $C_3S$  e  $C_2S$  com a água, que gera o gel silicato de cálcio hidratado (CSH) e o hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), porém é observada uma maior geração do  $Ca(OH)_2$  a partir do  $C_3S$ , assim como uma reação mais rápida quando comparada ao  $C_2S$ . O hidróxido de cálcio desempenha principalmente um papel de estabilizar a matriz do produto hidratado e formar carbonato de cálcio a partir de uma gradual absorção de  $CO_2$ . Ademais, nessa fase há formação de hidratos de aluminato de cálcio e hidratos de aluminoferrito de cálcio advindos da reação do  $C_3A$  e do  $C_4AF$  com a água, respectivamente. Nesse sentido, o rápido e pequeno aumento de temperatura observadas nessa etapa são explicadas pela rápida reação de hidratação observada do  $C_3S$  e do  $C_3A$ .<sup>19, 22</sup>

Na fase de dormência, uma certa barreira de etringita (trisulfoaluminato de cálcio hidratado) é gerada ao redor das partículas de cimento, desacelerando o processo de dissolução, enquanto silicatos do cimento gradualmente se dissolvem para formar os íons  $Ca^{2+}$  e  $OH^-$ . Além disso, há a lenta precipitação do gel CSH nesse período.<sup>23</sup>

Na etapa seguinte, observa-se uma intensa precipitação em novas fases sólidas do gel CSH e do hidróxido de cálcio, sendo o pico exotérmico desse período explicado por essa intensa hidratação do  $C_3S$ . Ademais, há elevada formação de etringita, composto essencial para desenvolver ligações químicas com outras substâncias no processo de endurecimento, a partir dos íons  $Ca^{2+}$  e  $OH^-$ , que por consequência têm sua concentração na mistura reduzida. Nesse período, os compostos  $C_3A$  e  $C_4AF$  continuam seu processo de hidratação, porém em taxas bem menores. É importante ressaltar que esse é o período que se inicia a cura e

endurecimento do cimento, endurecimento este que ocorre devido ao fato de alguns dos compostos formados possuírem natureza fibrosa ou cristalina, que se entrelaçam e se unem.<sup>19, 24</sup>

Por último, há o período da redução na liberação de calor, que se estende até o consumo completo do cimento, desde que alimentado com a proporção correta de água-cimento. Nessa fase, a precipitação dos hidratos continua, o que gradualmente causa uma redução na saturação da mistura, que gera maior dissolução dos minerais no cimento. Os compostos obtidos pelas reações de hidratação continuam se entrelaçando, o que gradualmente reduz a taxa de difusão dos íons do cimento na solução, assim gradativamente formando um material sólido, forte, resistente, não-permeável e com forte capacidade aglutinante conforme a água livre presente na mistura evapora.<sup>15, 19</sup>

Nesse contexto, com uma visão dos principais compostos químicos, reações e processos do cimento, é possível analisar os efeitos das principais adições minerais no produto final: os materiais pozolânicos, o filler calcário e a escória de alto forno. Cada um desses compostos apresentam diferentes interações com o cimento no processo de hidratação, o que gera um produto com propriedades e composições específicas, sendo excelentes opções tanto no ponto de vista ambiental, quanto funcional do cimento.<sup>16</sup>

## Materiais Pozolânicos

Materiais pozolânicos ou pozolanas são definidos como materiais inorgânicos, podendo ser naturais ou artificiais, que ao serem misturadas com água na presença de hidróxido de cálcio sofrem uma reação e produzem compostos químicos que desenvolvem resistência mecânica.<sup>25</sup> O nome pozolana vem do Monte Pozzuoli, onde são encontrados materiais pozolânicos naturais na forma de rochas vitrificadas formadas a partir de cinzas vulcânicas.<sup>25, 26</sup> Na antiguidade, os romanos já tinham conhecimento e faziam uso dessas rochas que, ao serem moídas e misturadas com cal, se tornavam um aglomerante inorgânico similarmente ao cimento portland tão comum nos dias atuais.<sup>25, 26</sup>

A reatividade destes materiais com a água para gerar resistência se dá ao fato de sua composição química ser majoritariamente sílica, ou dióxido de silício, e óxido de alumínio.<sup>25, 26, 27</sup> Quando em presença de um sistema de óxido de cálcio, ou cal, e água, iniciam-se uma série de reações que resultam em hidratos bastante semelhantes aos resultantes da reação de hidratação do clínquer de cimento portland, principalmente silicatos cálcicos hidratados (CSH), visto que

em geral a composição química das duas misturas é similar. Essas reações são chamadas de reações pozolânicas e a capacidade de um material de passar por esse processo, nominalmente a quantidade máxima de óxido de cálcio que pode reagir e a velocidade de reação, é chamada de atividade pozolânica.<sup>25</sup>

Por conta de sua definição bastante ampla, a classificação das pozolanas é um assunto complexo. Geralmente encontram-se divididas em duas categorias principais: pozolanas naturais e pozolanas artificiais. As pozolanas naturais incluem as já citadas rochas piroclásticas (origem vulcânica), clásticas (sedimentares) e materiais de origem mista.<sup>27</sup> Estes são materiais que não precisam passar por nenhum tipo de processo para exibirem atividade pozolânica, exceto a moagem do material.<sup>26</sup> Porém, seu uso é limitado por sua disponibilidade, estando restrito principalmente a países da Europa como Itália, Alemanha, Grécia e Rússia, que possuem depósitos abundantes de rochas vulcânicas e terras diatomáceas que se enquadram neste grupo.<sup>26, 27</sup>

Já as pozolanas artificiais são aquelas resultantes de tratamentos térmicos ou então subprodutos de processos industriais. Existem vários exemplos deste tipo de material, como o fumo de sílica da indústria siderúrgica e cinzas de casca de arroz, mas os principais cujo uso é amplamente difundido são as argilas calcinadas e as cinzas volantes.<sup>26, 27</sup>

As argilas calcinadas são materiais que exibem atividade pozolânica após tratadas em temperaturas entre 500 e 900 °C<sup>26</sup>, graças à desidratação dos minerais argilosos, resultando em um material amorfo rico em alumínio e sílica.<sup>25</sup> Já as cinzas volantes são resíduos vítreos formados durante a combustão de carvão ou coque pulverizado, coletados a partir da fumaça liberada por meio de filtros ou precipitadores eletrostáticos.<sup>25, 27</sup> Estes são os principais materiais pozolânicos utilizados como adições minerais graças à maior disponibilidade, seja por obtenção ou mesmo produção para este fim específico.<sup>26</sup>

Não é novidade a adição deste tipo de material ao cimento portland, com o primeiro registro de cimento pozolânico com argila calcinada datando a 1909 na Inglaterra e o primeiro com cinzas volantes a 1951 na França.<sup>25, 28</sup> Hoje, a pozolana continua sendo uma adição mineral muito comum, por dois motivos principais: as pozolanas tem custo energético menor que o clínquer e produzem menos CO<sub>2</sub> por quilo, reduzindo o impacto ambiental do cimento e reduzindo seus custos de produção; a adição dá algumas características

distintas ao produto final, além de melhorar outras já existentes.<sup>26, 27, 28</sup>

Quando adicionada ao cimento portland, a pozolana reagirá com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do clínquer, ou seja, irá sofrer uma reação pozolânica.<sup>25</sup> Este composto alcalino é de fácil solubilização e de lixiviação, e sua presença é elevada na massa de cimento portland, o que pode favorecer uma estrutura mais frágil para o concreto.<sup>25, 26</sup> Além disso, é um composto bastante suscetível à carbonatação, ou seja, a reação de desgaste causada pelo gás carbônico no ar, que pode também enfraquecer o cimento a longo prazo. Ao reagir com este e formar compostos que garantem resistência mecânica ao cimento, a pozolana irá tornar o concreto mais resistente e mais durável.<sup>26, 27, 29</sup>

Outras vantagens do seu uso incluem uma maior resistência química à ação de sulfatos, menor permeabilidade do concreto, menor quantidade de fissuras por expansão de álcali-agregados (menor basicidade)<sup>25, 26, 27</sup> e maior resistência mecânica do concreto a longo prazo, apesar de sua resistência a curto prazo ser levemente reduzida.<sup>30</sup>

No Brasil, as pozolanas artificiais são amplamente usadas como adição mineral, com seu tipo variando com a região e, conseqüentemente, sua disponibilidade. Nas regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste, é bastante comum o uso de argila calcinada como material pozolânico, por proximidade a depósitos de argila. Já no Sul do país, onde há uma concentração de usinas termelétricas movidas a carvão mineral, o uso de cinzas volantes é predominante.<sup>28</sup>

## Escória de Alto Forno

Escória de alto forno é o nome dado ao resíduo da indústria siderúrgica resultantes da produção do ferro, o qual é composto principalmente de silicatos e aluminossilicatos de cálcio. Como podemos ver, sua composição básica é semelhante à dos materiais pozolânicos e do clínquer portland, porém, a escória de alto forno sozinha possui pouca ou nenhuma capacidade aglomerante. Para que esta possa ser utilizada para este fim, deve ser, assim como as pozolanas, adicionada a outros compostos como cal, clínquer portland e compostos alcalinos, ou seja, sua adição ao cimento portland a torna ativada como composto cimentício.<sup>25</sup>

Como adição para o cimento, a escória de alto forno é utilizada desde 1892 na Alemanha, por meio de sua adição ao último processo de fabricação: a moagem de clínquer e gesso.<sup>28</sup> A sua reação de hidratação é semelhante à das pozolanas, consumindo o hidróxido de cálcio no clínquer para a formação

de compostos com resistência mecânica.<sup>25</sup> Semelhantemente, o concreto formado possui maior resistência mecânica a longo prazo em detrimento desta ser menor a curto prazo, além de maior resistência ao ataque químico de sulfatos, cloro e água marinha quando comparado ao concreto feito com cimento convencional.<sup>31</sup> Porém, se mostra mais vulnerável ao efeito da carbonatação, ao contrário do que contém pozolanas.<sup>31, 32</sup>

No Brasil, seu uso é comum na região Sudeste, onde estão localizadas as maiores siderúrgicas do país. Contudo, também é comum ser utilizada em outras regiões, apesar de ser em menores quantidades.<sup>28</sup>

## Filler de calcário

“Filler” é o nome dado às adições minerais que são moídas juntamente ao clínquer na fabricação de cimento, que podem ou não interagir quimicamente com os outros compostos.<sup>28, 33</sup> O calcário moído é um dos principais *fillers* utilizados, pois é de fácil obtenção na indústria cimenteira, considerando que a maioria das fábricas são construídas nas imediações de minas de calcário, o qual é também a matéria prima para o clínquer.<sup>8, 28</sup>

O *filler* de calcário foi utilizado como forma de reduzir os custos energéticos da produção de cimento durante a crise do petróleo de 1973, pois diminuía a quantidade de clínquer utilizada além de aumentar a moabilidade do cimento. Hoje, além dessas vantagens, sabe-se também que a adição de calcário em baixas quantidades no cimento, abaixo de 10% em peso, principalmente com clínquer que possui alta quantidade de C<sub>3</sub>A, também melhora algumas características do mesmo, como maior resistência inicial e mais resistência à sulfatos, ainda que esta seja menor à oferecida pela escória e pelas pozolanas.<sup>34</sup> Em geral, pode-se dizer também que o *filler* melhora a trabalhabilidade do concreto, isto é, a capacidade de moldá-lo em novas formas, pois as partículas de calcário servem como uma espécie de “lubrificante” para o cimento.<sup>28</sup>

## Classificação pela ABNT

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), órgão responsável pela normalização técnica no Brasil, tem como objetivo fornecer a base normativa necessária ao desenvolvimento tecnológico brasileiro, estabelecendo padrões necessários à produção, qualidade e segurança de produtos e serviços. Assim, em 2018, foi publicada a ABNT NBR 16697, norma técnica que especifica os requisitos para a produção e o fornecimento de cimento Portland. Essa norma define critérios como composição, especificações, embalagem, armazenamento e métodos de ensaio para diferentes tipos de

cimento Portland, visando assegurar a qualidade e a adequação do cimento para uso na construção civil. Nesse aspecto, tal norma divide o cimento Portland em sete principais tipos segundo sua composição química: Cimento Portland Comum (CP I), Cimento Portland Composto (CP II), Cimento Portland de Alto-Forno (CP III), Cimento Portland Pozolânico (CP IV), Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (CPBC), Cimento Portland Branco (CPB).<sup>7</sup>

O Cimento Portland Comum (CP I) é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, ao qual se adiciona apenas uma quantidade necessária de alguma forma de sulfato de cálcio durante sua fabricação. Na maioria das vezes, é adicionado gesso, que é utilizado como um retardador da pega. Esse é o tipo mais comum de cimento Portland, utilizado em uma variedade de aplicações de construção civil em situações em que não são exigidas propriedades especiais do cimento, como lajes, fundações, pisos e paredes.<sup>7, 34</sup>

Já o Cimento Portland Composto (CP II) se divide em três subtipos que são determinados pelas adições de escória de alto-forno (CP II-E), material pozolânico (CP II-Z) ou material carbonático (CP II-F). Devido a essas adições, é um tipo de cimento de maior resistência, além disso, o tempo de pega do material não é acelerado. Logo, é usado em obras que exigem maior resistência à sulfatação e, por ser mais versátil, pode ser usado em praticamente qualquer obra de concreto armado, como edifícios, pontes e viadutos.<sup>7, 35</sup>

Obtido através da mistura homogênea de clínquer Portland com escória granulada de alto-forno, o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) apresenta maior resistência final. Essa massa possui como benefício, além da alta resistência, elevada durabilidade até mesmo em ambientes mais agressivos. Portanto, é muito utilizada em obras de grande porte e infraestrutura, como barragens, grandes lajes, e fundações.<sup>7, 36</sup>

O Cimento Portland Pozolânico (CP IV) é produzido por meio da mistura de clínquer Portland e materiais pozolânicos, que podem ser moídos em conjunto ou separadamente. A adição destas pozolanas tende a aumentar a durabilidade desse material, o que faz com que esse seja fortemente indicado para obras expostas a ambientes agressivos, como construções marítimas, estações de tratamento de água e esgoto, e pavimentos rodoviários.<sup>7</sup>

Outro tipo é o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) que, como o nome sugere, foi desenvolvido

para atingir elevadas resistências mecânicas já nas primeiras horas após a sua aplicação. Esse rápido ganho de resistência o torna ideal para projetos de construção que exigem desforma precoce de peças de concreto ou quando é necessária a rápida utilização das estruturas, como em obras de restauração de pavimentos, fabricação de pré-moldados e montagens industriais que não podem tolerar longos períodos de interrupção. É uma massa muito utilizada na região sul do país.<sup>36</sup>

Ademais, o Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (CPBC) é formulado especificamente para minimizar a quantidade de calor liberado durante o processo de hidratação do cimento, uma característica essencial para a construção de grandes volumes de concreto, como em barragens, fundações profundas e pilares de grandes estruturas. A produção do CPBC envolve a redução do conteúdo de clínquer e o aumento de componentes como escórias de alto-forno, cinzas volantes ou pozolanas, que reagem mais lentamente com a água.<sup>36</sup>

Por fim, o Cimento Portland Branco (CPB) se diferencia pela sua coloração, esse é composto de clínquer Portland branco cujas adições de sulfato de cálcio e outros componentes não causam alteração em sua cor. Pode ser classificado em estrutural e não estrutural. O estrutural é frequentemente usado em trabalhos de arquitetura onde a estética é importante, como revestimentos, argamassas de acabamento, elementos pré-moldados visíveis e obras de arte em concreto. Por outro lado, o não estrutural é aplicado em instalações não estruturais, como rejuntas de azulejos, por exemplo.<sup>7, 35</sup>

## Conclusões

Em suma, este artigo de revisão destacou o papel vital do cimento Portland na infraestrutura global e a crescente necessidade de inovações sustentáveis na indústria cimenteira para atender à demanda por desenvolvimento infraestrutural, minimizando ao mesmo tempo o impacto ambiental e o esgotamento dos recursos naturais não renováveis. A investigação centrou-se nas adições minerais - especificamente materiais pozolânicos, escória de alto forno e filler de calcário - como alternativas viáveis para aumentar a sustentabilidade do cimento Portland, oferecendo simultaneamente melhorias significativas em termos de propriedades mecânicas e durabilidade do material.

Os materiais pozolânicos, por exemplo, demonstraram capacidade de melhorar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto, além de contribuir para a redução

das emissões de CO<sub>2</sub>, graças ao seu baixo consumo energético e menor quantidade de CO<sub>2</sub> emitida em sua produção, em comparação ao clínquer. Da mesma forma, a escória de alto forno, como subproduto da indústria siderúrgica, apresenta benefícios notáveis quando adicionada ao cimento, incluindo maior resistência a longo prazo e melhor desempenho em ambientes agressivos. O filler de calcário, por outro lado, além de reduzir os custos energéticos associados à produção de cimento, também mostrou melhorar a forma de trabalhar o concreto e as propriedades mecânicas iniciais.

Ademais, a normatização pela ABNT, através da NBR 16697, destaca a importância de padrões e especificações que assegurem a qualidade e adequação do cimento Portland para uso na construção civil, ao mesmo tempo que incorpora práticas sustentáveis na produção cimenteira. Essa norma reflete o compromisso do setor em adaptar-se às exigências contemporâneas de sustentabilidade, sem comprometer a eficácia e a eficiência do material.

Em conclusão, a inclusão de adições minerais no cimento Portland não só atende às demandas por materiais de construção de menor impacto ambiental, mas também oferece melhorias significativas nas propriedades do cimento, abrindo novas possibilidades para a construção civil. A continuação da pesquisa e desenvolvimento nessas áreas é essencial para garantir que a indústria cimenteira possa contribuir de forma eficaz para uma infraestrutura global sustentável, resiliente e de alta qualidade. A colaboração entre pesquisadores, indústria e reguladores será crucial para promover inovações que alinhem as práticas de produção de cimento com os objetivos de desenvolvimento sustentável, garantindo, assim, um futuro mais verde para a construção civil global.

## Contribuições por Autor

Introdução e Metodologia: Júlia R. Vargas.

Química do cimento: Vinícius Neibert Bezerra

Materiais Pozolânicos, Escória de Alto Forno e Filler de calcário: Eliardo

Classificação pela ABNT e Conclusão: Bárbara Emília Ribeiro Alcântara.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB/MEC, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação

(DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

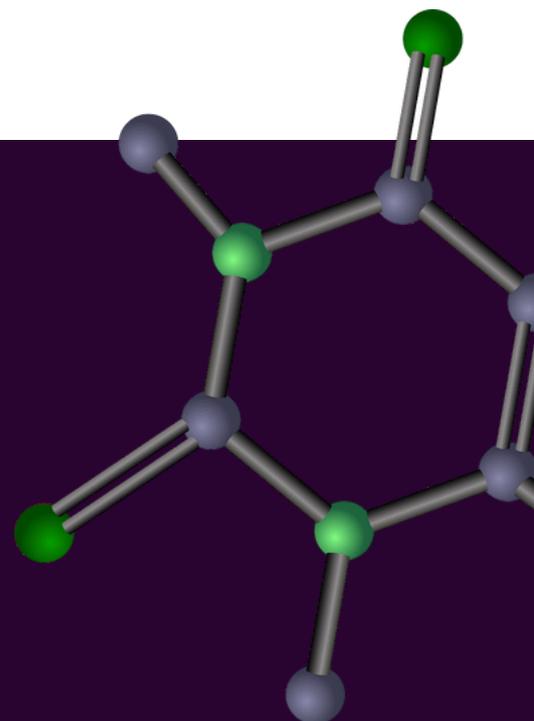
- 1 K.L. Scrivener, P. Juilland and P. J. M. Monteiro, Advances in understanding hydration of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 2015, **78**, 38-56.
- 2 SANTIN, Indústria do cimento acelera a transição rumo a uma economia neutra em carbono, <https://abcp.org.br/industria-do-cimento-acelera-a-transicao-rumo-a-uma-economia-neutra-em-carbono/>, (accessed Mrch 17, 2024).
- 3 M. B. Maury and R. Blumenschein, Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente, *Sustentabilidade em Debate*, 2012, **3**, 75-96.
- 4 A. Martins, S. Mercadé, J. Aoki, F. Madi, C. G. Marcondes and I. Neves, *Cimento*, 2007.
- 5 O que é cimento?, <https://www.portaldoconcreto.com.br/o-que-e-cimento/>, (accessed March 12, 2024).
- 6 A. Lima, O processo produtivo do cimento Portland, Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2011.
- 7 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 16697, Cimento Portland - Requisitos, Rio de Janeiro, RJ, 2018, [https://saturno.crea-rs.org.br/pop/profissional/ABNT\\_NBR\\_16697\\_2018.pdf](https://saturno.crea-rs.org.br/pop/profissional/ABNT_NBR_16697_2018.pdf).
- 8 How Cement Is Made, <https://www.cement.org/cement-concrete/how-cement-is-made>, (accessed 17 March 2024).
- 9 N. I. W. D. Silva, L. M. Calarge, F. Chies, J. E. Mallmann and O. Zwonok, Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico, *Cerâmica*, 1999, **45**, 184–187.
- 10 E. Petrucci, *Concreto de Cimento Portland*, Editora Globo, 13th edn., 1998.
- 11 G. Da Fonseca, Adições Minerais e as Disposições Normativas Relativas à Produção de Concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2010.
- 12 G. Cordeiro and R. Fairbairn, Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios, *Quim. Nova*, 2009, **32**, 82–86.
- 13 P. C. Abrão, O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), 2019.
- 14 L. Rosa, Materiais cimentícios suplementares: histórico e novas tendências, <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/materiais-cimenticios>, (accessed 17 March 2024).
- 15 J. W. Bullard, H. M. Jennings, R. A. Livingston, A. Nonat, G. W. Scherer, J. S. Schweitzer, K. L. Scrivener and J. J. Thomas, Mechanisms of cement hydration, *Cement and Concrete Research*, 2011, **41**, 1208–1223.
- 16 V. G. de Castro, Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro, Editora Universitária da Ufersa - EdUFERSA, Mossoró, RN, 2022.
- 17 I. Odler, Special inorganic cements, *E & FN Spon*, New York, 2000.
- 18 L. D. A. Gobbo, Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, 2003.
- 19 I. Odler, in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier, 1998, pp. 241–297.
- 20 D. D. Stokke, Q. Wu and G. Han, Introduction to wood and natural fiber composites, *Wiley*, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2014.

- 21 Y. M. Wei, Y. Guang Zhou and B. Tomita, Hydration behavior of wood cement-based composite I: evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary portland cement, *J Wood Sci*, 2000, **46**, 296–302.
- 22 P. D. Evans and Australian Centre for International Agricultural Research., Wood-cement composites in the Asia-Pacific Region: proceedings of a workshop held at Rydges Hotel, Canberra, Australia on 10 December 2000, Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, 2002.
- 23 K. R. Backe, O. B. Lile and S. K. Lyomov, Characterizing Curing Cement Slurries by Electrical Conductivity, *SPE Drilling & Completion*, 2001, **16**, 201–207.
- 24 J. P. Vieira, Mestrado em Interação Cimento-superplastificante, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.
- 25 F. M. Lea and P. C. Hewlett, *Lea's chemistry of cement and concrete*, Elsevier-Butterworth-Heinemann, Amsterdam London Paris, 4th edition., 2004.
- 26 V. A. Zampieri and Y. Kihara, *Contribuição ao Estudo de Pozolanas de Argilas Calcínadas Brasileiras*, *Cerâmica*, 1982, **28**, 145-167.
- 27 V. A. Zampieri and Y. Kihara, in *Contribuição ao estudo de Pozolanas no Brasil*, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1988.
- 28 A. F. Battagin and J. O. de Carvalho, *Blends: Cementing Brazil's Sustainability*, *World Cement*, 2015, 28–35.
- 29 M. J. Shannag and A. Yeginobali, *Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan*, *Cement and Concrete Research*, 1995, **25**, 647–657.
- 30 B. Uzal and L. Turanli, *Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans*, *Cement and Concrete Research*, 2003, **33**, 1777–1781.
- 31 G. J. Osborne, Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, 1999, **21**, 11–21.
- 32 Ş. C. Bostancı, M. Limbachiya and H. Kew, Portland slag and composites cement concretes: engineering and durability properties, *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**, 542–552.
- 33 K. D. Ingram and K. E. Daugherty, *A review of limestone additions to Portland cement and concrete*, *Cement and Concrete Composites*, 1991, **13**, 165–170.
- 34 F. G. Simões, Avaliação macroscópica e microscópica do Cimento Portland Comum - CP I e do Cimento Portland Branco não estrutural - CPB incluídos na calvária de ratos, Universidade de São Paulo (USP), 2008.
- 35 S. A. Padilha, C. M. Paliga and A. S. Torres, ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PRODUZIDOS COM DIFERENTES CIMENTOS E DOSADOS EM AMBIENTE DE FÁBRICA, *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, DOI:10.5216/reec.v13i2.46469.
- 36 J. A. Cabrera-Madrid, J. I. Escalante-García, P. Castro-Borges, J. A. Cabrera-Madrid, J. I. Escalante-García and P. Castro-Borges, Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. Re-revisão do estado da arte, *Revista ALCONPAT*, 2016, **6**, 64–83.

 [protocolosemquimica@gmail.com](mailto:protocolosemquimica@gmail.com)

 [@protocolosemquimica](https://www.instagram.com/protocolosemquimica)

 <https://protocolosemquimica.com/>



O grupo PET-Química/IQ/UnB agradece à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial.

