



MECÂNICA DOS FLUIDOS APLICADA À ENGENHARIA DE PRODUÇÃO: EMPUXO E DENSIDADE COMO FERRAMENTAS DE CONTROLE DE QUALIDADE E SEPARAÇÃO INDUSTRIAL

Caike Oliveira Sousa¹, Carlos Henrik Silva Brandão¹, Hiarlle Rennan Santos Pereira¹, Nickolas Brayam da Cruz Neves¹, Phamilla Gracielli Sousa Rodrigues^{1*}

¹Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Parauapebas, Pará
(Phamilla@ufra.edu.br)

Resumo: Este trabalho explora o Princípio de Arquimedes (empuxo) e sua aplicação como ferramenta de controle de qualidade e separação industrial na Engenharia de Produção. Para demonstrar o fenômeno na prática, foi realizado um experimento utilizando um recipiente cilíndrico transparente de 11,5 cm de diâmetro, preenchido com uma coluna de água de 19,5 cm, e quatro esferas de materiais distintos, porém com diâmetros semelhantes entre si: espuma, pano, plástico e borracha. Cada esfera foi pesada em balança digital e, em seguida, imersa individualmente no recipiente, registrando-se o deslocamento da coluna de água para determinar o volume submerso e, a partir dele, calcular a densidade de cada material e a força de empuxo correspondente. Os resultados confirmaram o comportamento previsto pela teoria: a esfera de espuma ($0,146 \text{ g/cm}^3$), a de pano ($0,538 \text{ g/cm}^3$) e a de plástico ($0,663 \text{ g/cm}^3$) flutuaram, com graus distintos de submersão, enquanto a de borracha ($1,644 \text{ g/cm}^3$) afundou, já que seu peso superou a força de empuxo exercida pela água. O pano flutua inicialmente quando seco, mas pode afundar após ser totalmente submerso por absorver água. Esses resultados foram então relacionados a duas aplicações industriais reais que utilizam o mesmo princípio físico: o controle de qualidade por flutuação na indústria alimentícia, usado para identificar produtos deteriorados ou com defeitos internos, e a flotação mineral na mineração, empregada na separação entre minérios valiosos e rejeito. A discussão evidencia que, apesar de aplicados a contextos de negócio distintos, ambos os processos dependem do mesmo fundamento físico para realizar separação e inspeção em larga escala, reforçando a relevância prática da Mecânica dos Fluidos na formação do engenheiro de produção.

Palavras-chave: Empuxo; Densidade; Controle de qualidade; Flotação mineral; Engenharia de produção

INTRODUÇÃO

A Mecânica dos Fluidos é um dos pilares teóricos que sustentam decisões reais de Engenharia de Produção. Embora costume ser associada a tubulações, bombas e sistemas hidráulicos, um dos seus princípios mais simples, o Empuxo, descrito pelo Princípio de Arquimedes, tem aplicação direta em dois processos industriais essenciais: o controle de qualidade e a separação de materiais por densidade.

O Princípio de Arquimedes estabelece que todo corpo imerso em um fluido recebe uma força de empuxo, dirigida para cima, igual ao peso do volume de fluido deslocado por esse corpo. Quando a densidade do objeto é menor que a do líquido, ele flutua; quando é maior, ele afunda; quando as densidades são praticamente iguais, o objeto permanece em equilíbrio, suspenso no meio do líquido (Halliday, Resnick e Walker, 2016; Brunetti, 2008).

Esse comportamento é determinístico e mensurável, por isso pode ser usado como método de triagem e inspeção em larga escala. Este trabalho tem como objetivo demonstrar, por meio de um experimento prático, o princípio do empuxo, e conectar esse conhecimento a duas aplicações industriais reais: a inspeção de produtos alimentícios por flutuação e a flotação mineral usada na mineração.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido com um recipiente cilíndrico transparente de 11,5 cm de diâmetro, preenchido com água até uma coluna inicial de 19,5 cm de altura. Foram utilizadas quatro esferas de materiais distintos e diâmetros semelhantes, espuma, pano, borracha e plástico, cada uma pesada em balança digital com precisão de $\pm 0,01$ g. Cada esfera foi imersa individualmente no recipiente, registrando-se a nova altura da coluna de água para determinar o volume de líquido deslocado pelo método de deslocamento de volume (princípio de Arquimedes aplicado experimentalmente).

A densidade de cada esfera foi calculada a partir da razão entre sua massa e o volume teórico de uma esfera ($V = 4/3 \pi r^3$), permitindo comparar o valor calculado com o comportamento observado. Em

alguns casos, o volume deslocado obtido pela leitura da coluna de água superou o volume teórico total da própria esfera, o que fisicamente não é possível; essa inconsistência foi atribuída a fatores experimentais, como possível falta de perfeito nivelamento ou verticalidade do recipiente e a dificuldade de leitura precisa da régua na presença do menisco. Por esse motivo, optou-se por adotar, nos cálculos de empuxo, o volume teórico da esfera totalmente submersa, e não o volume deslocado medido diretamente no recipiente. Os dados foram organizados em tabela comparativa e analisados à luz do Princípio de Arquimedes, relacionando-se os resultados às aplicações industriais de controle de qualidade alimentício e de flotação mineral.

O comportamento observado em cada objeto é explicado pelo equilíbrio entre a força de empuxo e o peso do corpo. A força de empuxo (E) é dada pela Equação 1, em que ρ_l é a densidade do líquido, g é a aceleração da gravidade e V_s o volume de líquido deslocado pelo corpo submerso.

$$E = \rho_l \cdot g \cdot V_s \quad (1)$$

O peso do corpo (P) é dado pela Equação 2, em que ρ_o é a densidade do objeto e V_o é o volume total do objeto.

$$P = mg = \rho_o \cdot g \cdot V_o \quad (2)$$

Como o volume submerso é, no máximo, igual ao volume do objeto, para este caso, a condição de flutuação depende exclusivamente da comparação entre as densidades, conforme a Equação 3: quando a densidade do objeto (ρ_o) é menor que a densidade do líquido (ρ_l), o corpo flutua; quando é maior, o corpo afunda; quando as densidades são iguais, o corpo permanece em equilíbrio.

$$\rho_o < \rho_l \Rightarrow \text{flutua}$$

$$\rho_o \geq \rho_l \Rightarrow \text{afunda} \quad (3)$$

$$\rho_o \equiv \rho_l \Rightarrow \text{permanece em equilíbrio} \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados confirmaram o comportamento previsto pelo Princípio de Arquimedes: ao serem depositados na superfície da água, a esfera de espuma (densidade $0,146 \text{ g/cm}^3$) flutuou com a maior parte do volume fora da água; a de pano

(0,538 g/cm³, densidade aparente seca) e a de plástico (0,663 g/cm³) também flutuaram, com maior volume submerso que a de espuma; e a esfera de borracha (1,644 g/cm³), por apresentar densidade superior à da água, afundou até o fundo do recipiente. O pano flutua inicialmente quando seco, mas pode afundar após ser totalmente submerso por absorver água, tendo densidade aparente seca menor que a da água, porém, ao absorver água, pode atingir densidade superior à da água.

Para ilustrar o procedimento de cálculo adotado, toma-se como exemplo a esfera de plástico, que apresentava raio de 2,8 cm. O volume da esfera foi obtido pela Equação $V = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3$, resultando em $V = 4/3 \cdot \pi \cdot (2,8)^3 \approx 91,95 \text{ cm}^3$, aqui adotado como 92,0 cm³. A densidade foi então calculada pela razão entre a massa medida (61,00 g) e esse volume, $\rho = 61,00 / 92,0 \approx 0,663 \text{ g/cm}^3$.

Com esse valor, aplicou-se a Equação 1 para obter o empuxo considerando a esfera de plástico totalmente mergulhada no líquido ($V_s \approx 92,0 \text{ cm}^3$, ou $9,20 \times 10^{-5} \text{ m}^3$), admitindo a água com densidade de 1000 kg/m³ e a aceleração da gravidade local como 9,8 m/s²: $E = \rho_l \cdot g \cdot V_s = 1000 \cdot 9,8 \cdot 9,20 \times 10^{-5} \approx 0,901 \text{ N}$.

O peso da esfera foi calculado pelo produto da massa pela aceleração da gravidade (Equação 2, tomando g como 9,8 m/s²), equivalente a $P = m \cdot g = 0,061 \cdot 9,8 \approx 0,598 \text{ N}$. Como o empuxo calculado (0,901 N) foi superior ao peso (0,598 N), confirmou-se, pela Equação 3, que a esfera deveria flutuar — o que de fato foi observado experimentalmente.

O mesmo procedimento descrito para a esfera de plástico foi aplicado às demais esferas (espuma, pano e borracha), e os resultados obtidos para cada uma estão organizados na Tabela 1, que relaciona o volume, a densidade, o peso, a força de empuxo calculada e o comportamento observado.

Tabela 1. Volume, densidade, peso, força de empuxo calculada e comportamento observado das esferas testadas.

Objeto	Vol. (cm ³)	Dens. (g/cm ³)	Peso (N)	Empuxo (N)	Resultado
Espuma	82,4	0,146	0,118	0,808	Flutua
Pano	102,2	0,538	0,539	1,001	Flutua inicialmente; afunda após saturação
Plástico	92,0	0,663	0,598	0,901	Flutua

Borracha	102,2	1,644	1,646	1,001	Afunda
----------	-------	-------	-------	-------	--------

Os resultados obtidos no experimento confirmaram o comportamento previsto pelo Princípio de Arquimedes: as esferas com densidade inferior à da água (espuma e plástico) flutuaram, enquanto a esfera com densidade superior à da água afundou. A esfera de pano, contudo, por se tratar de um material poroso e absorvente, teve um comportamento distinto. Considerando sua massa seca, sua densidade aparente foi de 0,538 g/cm³, valor inferior à densidade da água, o que explica sua flutuação inicial. Entretanto, após a submersão completa, o pano absorveu água, aumentando sua massa efetiva e, conseqüentemente, sua densidade aparente úmida. Dessa forma, o material passou a afundar após a saturação. Em todos os casos, a comparação entre a força de empuxo calculada e o peso de cada esfera (Tabela 1) explicou corretamente o comportamento observado, validando experimentalmente as Equações 1, 2 e 3.

Controle de qualidade na indústria alimentícia

Esse mesmo princípio observado no experimento é o fundamento de um processo industrial relevante para a Engenharia de Produção: o controle de qualidade por flutuação na indústria alimentícia. Produtos deteriorados, como ovos velhos ou grãos de café e cacau vazios, apresentam densidade diferente da dos produtos íntegros (Fellows, 2006), e por isso flutuam de forma distinta, assim como as esferas testadas flutuaram conforme sua própria densidade. Em uma linha de produção, o produto entra em um tanque com líquido de densidade calibrada, e os itens fora do padrão são automaticamente desviados, sem necessidade de inspeção manual individual.

Flotação mineral na mineração

Na mineração, a flotação mineral aplica o mesmo princípio em escala industrial. O minério bruto, após a moagem, é colocado em um tanque com água e reagentes químicos específicos, onde bolhas de ar são injetadas no sistema; os minerais valiosos aderem a essas bolhas, pelo efeito de empuxo somado à afinidade de superfície, e sobem até formar uma camada de espuma recolhida na superfície, enquanto o rejeito permanece no fundo



do tanque (Luz et al., 2010). Da mesma forma que, no experimento, a posição final de cada esfera dependeu da relação entre densidades, aqui é essa mesma relação que separa o minério valioso do rejeito. Esse processo é amplamente utilizado na separação de cobre, ouro, ferro, carvão mineral e fosfato, e sua eficiência é otimizada por engenheiros de produção, que ajustam variáveis como tempo de retenção, quantidade de reagente e tamanho das bolhas para maximizar o rendimento.

Em ambos os casos, assim como no experimento realizado, a posição final de cada elemento, esfera, produto alimentício ou partícula mineral, depende da relação entre densidades, o que demonstra que o fenômeno observado em escala de laboratório é diretamente escalável para processos industriais reais de inspeção e separação. Contudo, em um caso real de flotação mineral, também importam reagentes, presença de bolhas, propriedades superficiais e hidrofobicidade, fatores que precisariam ser considerados.

É importante destacar, no entanto, que o experimento apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Embora as esferas utilizadas tenham permitido demonstrar de forma clara e controlada o princípio físico do empuxo, elas não reproduzem com exatidão as propriedades específicas dos materiais industriais reais, de modo que os valores de densidade e empuxo aqui obtidos servem como demonstração conceitual do fenômeno, e não como dados aplicáveis diretamente aos processos industriais discutidos. Para estudos futuros, indicam-se análises de separação em produtos industriais reais, como minérios, ou de produtos alimentícios, como ovos e frutas, para avaliação da reprodutibilidade e de possíveis fatores de interferência adicionais, como a maturação de grãos ou o blend de minérios.

CONCLUSÃO

O experimento de classificação por densidade permitiu mostrar, de forma simples e com baixo custo, um dos princípios físicos que está por trás de processos industriais de grande impacto econômico no mercado atual. Da inspeção de ovos e frutas em uma indústria alimentícia até a recuperação de minérios valiosos em uma mineradora, é o mesmo

conceito de empuxo que aparece. Para o engenheiro de produção, compreender aspectos da Mecânica dos Fluidos vai muito além de um conhecimento teórico, tratando-se também de uma ferramenta prática, que possibilita identificar oportunidades de automatizar inspeções, reduzir desperdícios e tornar os processos produtivos mais eficientes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) pelo apoio dado na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BRUNETTI, F. Mecânica dos Fluidos. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- FELLOWS, P. J. Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física – Mecânica. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, v. 1, 2016.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.