
Pressão e volume em balões de festa: podemos confiar em nossa intuição?*

Pressure and volume in party balloons: How reliable is our intuition?

CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA, v. 21, n. 3: p. 285-295, DEZ. 2004

CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA, EDIÇÃO ESPECIAL: p. 143-153, DEZ. 2004

Fernando Lang da Silveira – lang@if.ufrgs.br

Yan Levin – levin@if.ufrgs.br

Instituto de Física da UFRGS

Resumo. *Dois balões, ambos com o mesmo tamanho original e desigualmente inflados, são conectados às extremidades de uma mangueira, na qual uma obstrução impede a passagem de ar. Demonstra-se que, quando a obstrução é removida, o balão menor tanto poderá inflar quanto desinflar ou até mesmo permanecer com o volume inalterado. A possibilidade que se concretizará depende dos volumes iniciais dos dois balões.*

Palavras-chave: *pressão, tensão superficial, elasticidade da borracha, termodinâmica, experimentos contra-intuitivos, ensino de física.*

Abstract. *Two identical rubber balloons are inflated to different size and connected by a hose with a valve. It is shown that when the valve is opened, it is possible for a smaller balloon to grow, shrink, or remain with its size unaltered. Which one of these situations is actually realized depends on the initial volumes of the two balloons.*

Keywords: *pressure, surface tension, rubber elasticity, thermodynamics, counter-intuitive experiments, physics education.*

1. Introdução

A figura 1 representa dois balões de festa iguais (de mesma procedência e de mesmo tamanho original), ligados às extremidades de uma mangueira flexível na qual um grampo

* – O problema dos balões gerou um artigo com uma abordagem teórica e matemática mais aprofundada do que a atual versão – LEVIN, Y. e SILVEIRA, F. L. Two rubber balloons: phase diagram of air transfer. *Physical Review E*, 69, 051108, 2004 – , merecendo uma nota de destaque na revista *Nature*, v. 428, p.273, março de 2004.

impede a passagem de ar. O balão da esquerda, que se encontra a uma pressão p_1 , está menos inflado do que o da direita, que se encontra a uma pressão p_2 . Quando a mangueira é desobstruída pela remoção do grampo, flui ar da região de pressão maior para a região de pressão menor até se estabelecer o equilíbrio. O que irá ocorrer com o volume dos balões depois da retirada do grampo? Qual dos balões diminuirá de volume?

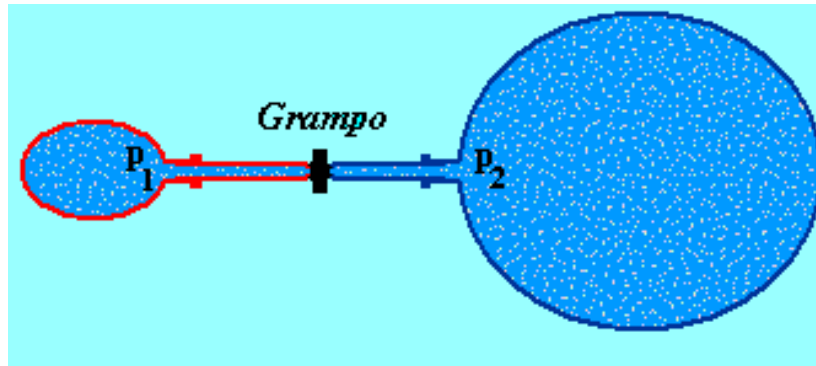


Figura 1 – Dois balões ligados a uma mangueira que está obstruída por um grampo.

Para responder tais questões é preciso descobrir em qual dos balões a pressão inicial é maior.

2. Pressão no interior de um balão

Dentro de um balão de festa inflado, a pressão é levemente maior do que a pressão externa (pressão atmosférica). Como mostraremos adiante, a diferença entre a pressão no interior do balão e a pressão atmosférica é de apenas alguns centímetros de mercúrio¹ (cm Hg). Lembremos que a pressão atmosférica corresponde a cerca de 76 cm Hg.

A diferença de pressão entre a parte interna e a parte externa do balão (a chamada *pressão manométrica*) deve-se à membrana de borracha que constitui a parede do balão. A *lei de Laplace* afirma que a *pressão manométrica* desenvolvida por uma membrana é diretamente proporcional à *tensão superficial* da membrana e inversamente proporcional ao *raio de curvatura médio da membrana* (Saveliév, 1982).

Da *lei de Laplace* decorre que, sendo constante a tensão superficial, a *pressão manométrica* diminui conforme aumenta o raio de curvatura da membrana. Em bolhas de sabão, por exemplo, a *tensão superficial* da mistura de água com sabão é uma propriedade exclusiva desta mistura: independe do raio e, portanto, do volume da bolha. Desta forma, quanto maior é o raio da bolha de sabão, tanto menor é a *pressão manométrica* no interior da bolha². Logo que duas bolhas de sabão aderem uma na outra, e se interconectam

¹ – Quando soprarmos com a boca somos capazes de exercer uma pressão que é apenas alguns cm Hg maior do que a pressão atmosférica, o que é suficiente para encher o balão.

² – Este resultado é contra-intuitivo, pois as pessoas costumam pensar que quanto maior for a bolha, tanto maior deveria ser a pressão no interior dela.

permitindo a passagem de ar entre elas, a bolha menor se esvazia e a grande infla. A soma dos volumes iniciais das duas bolhas é menor do que o volume da bolha única que existe no final³.

Já uma membrana de borracha como a do balão de festa tem *tensão superficial* variando com as deformações que ela sofre. Assim sendo, o comportamento da *pressão manométrica* em um balão é mais complexo do que em uma bolha de sabão. O gráfico da figura 2 representa dados experimentais sobre a *pressão manométrica* e o volume de um balão de festa (no Anexo encontra-se uma descrição do procedimento experimental utilizado na obtenção dos dados).

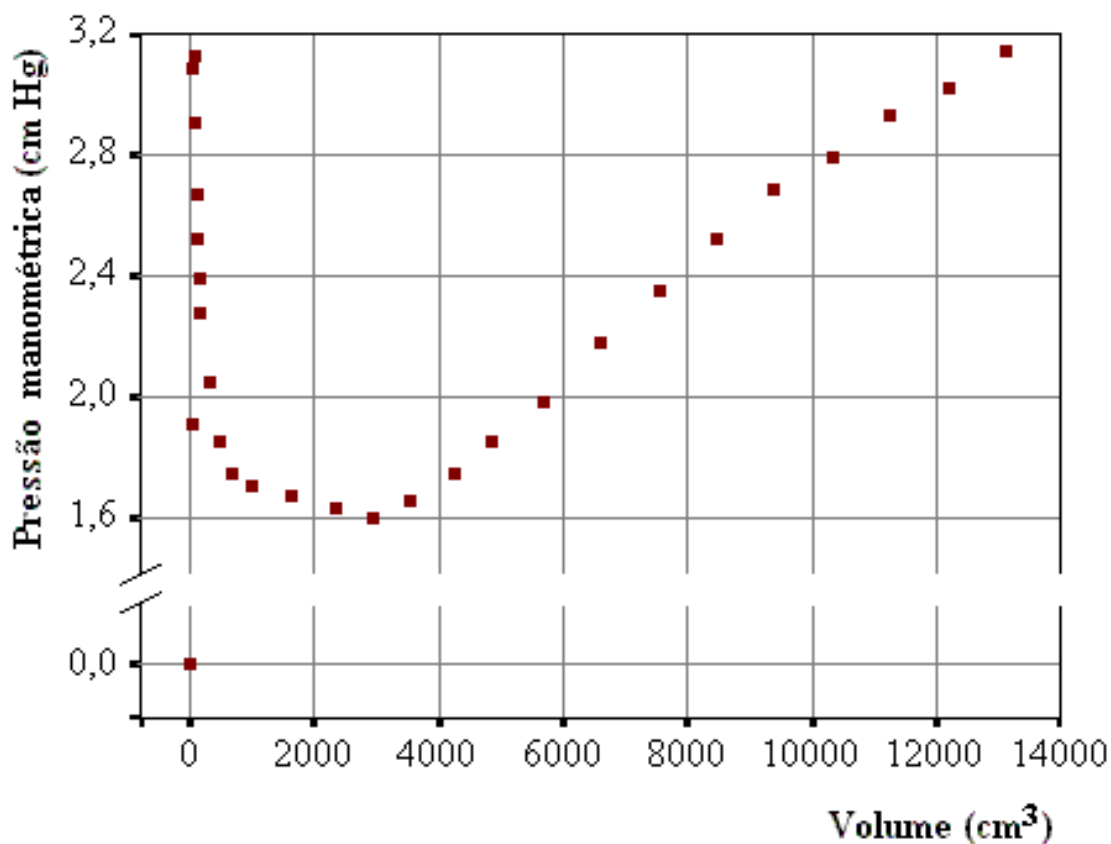


Figura 2 - Resultados experimentais para a pressão manométrica em um balão de festa em função do volume do próprio balão.

O experimento foi levado a efeito até a ruptura do balão, o que aconteceu a um volume máximo de aproximadamente 13000 cm³. Observa-se que inicialmente, com um volume muito pequeno (cerca de 20 cm³), a *pressão manométrica* era 1,9 cm Hg e atingiu o valor máximo de 3,1 cm Hg quando o volume era apenas 60 cm³. Depois, à medida que o

³ – Quando produzimos espuma em um balde, agitando água com sabão, pode-se notar que, depois de cessada a agitação, o volume da espuma continua crescendo. O crescimento do volume da espuma é explicado pela não-conservação (aumento) do volume total das bolhas que se interconectam.

volume foi aumentando, a pressão diminuiu⁴, sendo que um mínimo de pressão igual a 1,6 cm Hg aconteceu quando o volume do balão era cerca 3000 cm³ (cerca de 1/4 do seu volume máximo). Para volumes acima de 3000 cm³, a pressão aumentou, atingindo o valor de aproximadamente 3,1 cm Hg imediatamente antes de o balão arrebentar.

3. Os dois balões conectados: a possibilidade contra-intuitiva de passar ar do balão menor para o balão maior

Conhecido o comportamento da pressão no interior de um balão, podemos discutir o que acontecerá quando dois balões, com diferentes volumes são conectados por uma mangueira. Inicialmente apresentamos a curva da *pressão manométrica* contra o volume, indicando estados possíveis para dois balões (Figura 3), ainda com a mangueira obstruída.

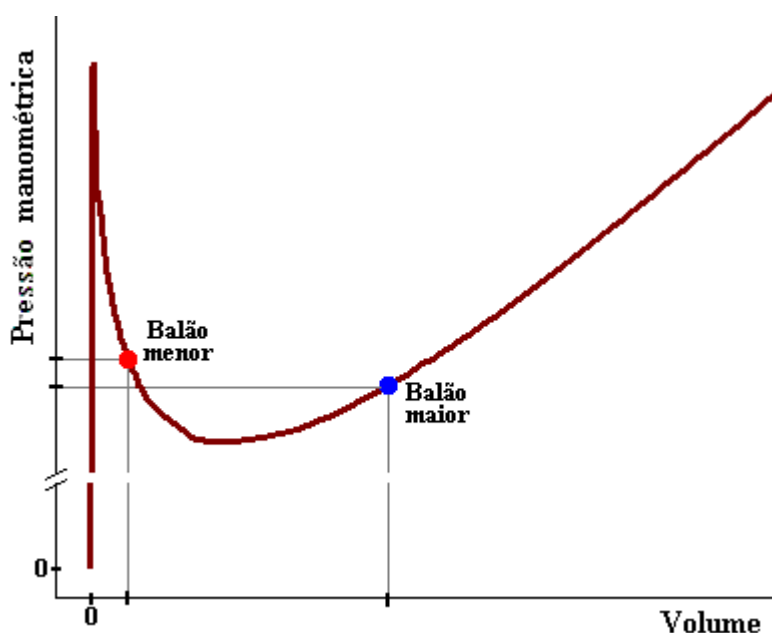


Figura 3 - Um exemplo de estados possíveis para dois balões antes da retirada do grampo que obstrui a mangueira de conexão.

No caso aqui representado, o balão de menor volume encontra-se inicialmente a uma pressão maior do que o outro. Então, quando é liberada a passagem de ar de um para o outro, flui ar do balão menor para o maior. A concretização desta possibilidade contra-intuitiva é demonstrada nas fotografias da figura 4.

⁴ – Quando soprmos um balão com a boca, é notório que temos mais dificuldade de insuflar ar no balão no início do enchimento. Esta constatação é coerente com o que nossos dados revelam. De fato, a *pressão manométrica* no interior de um balão pouco inflado, com um volume de aproximadamente 60 cm³, é superior às pressões que se verificam para volumes maiores. Note na figura que até cerca de 13000 cm³ de volume, a pressão se mantém inferior a 3,1 cm Hg.

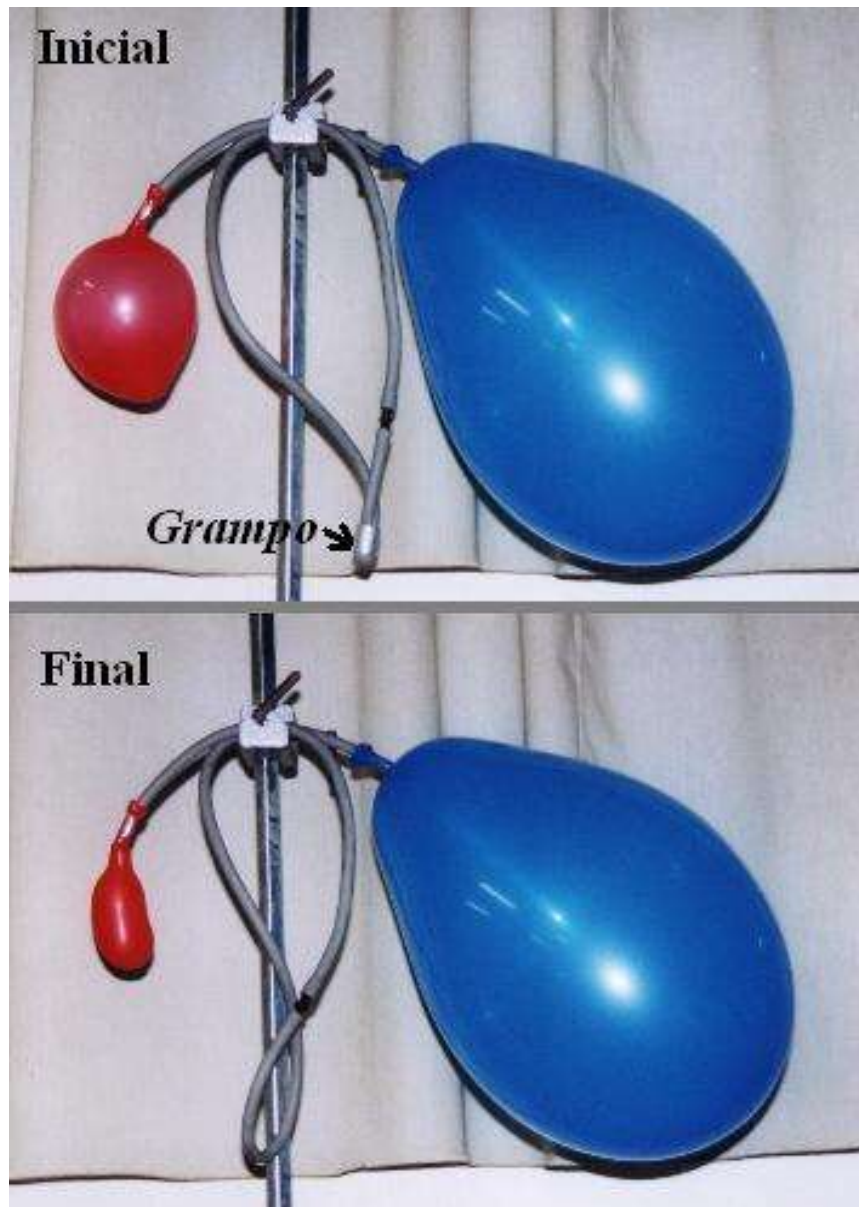


Figura 4 - Notoriamente o ar flui do balão menor para o balão maior.

4. Os dois balões conectados: a possibilidade de passar ar do balão maior para o menor

A figura 5 apresenta, no diagrama da *pressão manométrica* contra o volume, outros estados possíveis para dois balões antes da retirada do grampo que obstrui a passagem de ar pela mangueira.

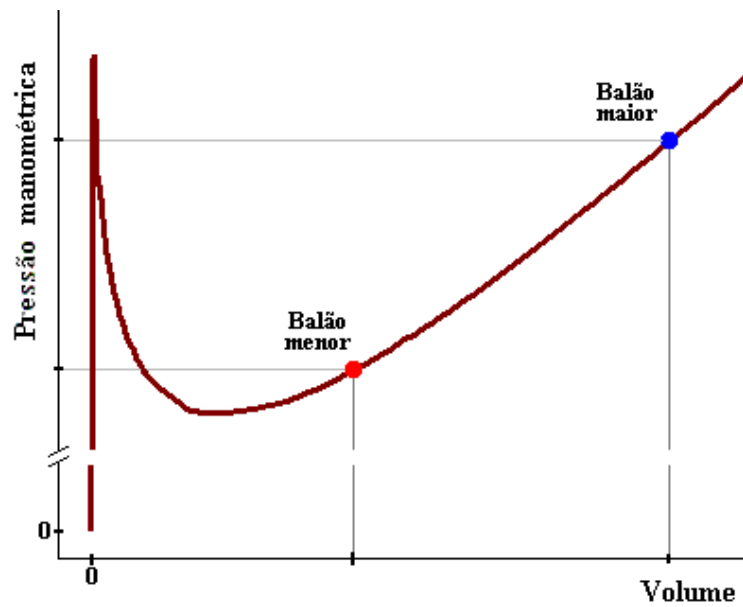


Figura 5 - Outro exemplo de estados possíveis para dois balões antes da retirada do grampo que obstrui a mangueira de conexão.

Nesta situação, o balão menor (menos inflado) é o que apresenta a mais baixa pressão. Então, sem conflito com nossa intuição, quando se libera a passagem do ar entre os balões, ele flui do balão maior para o menor. A concretização desta possibilidade é demonstrada nas fotografias da figura 6.

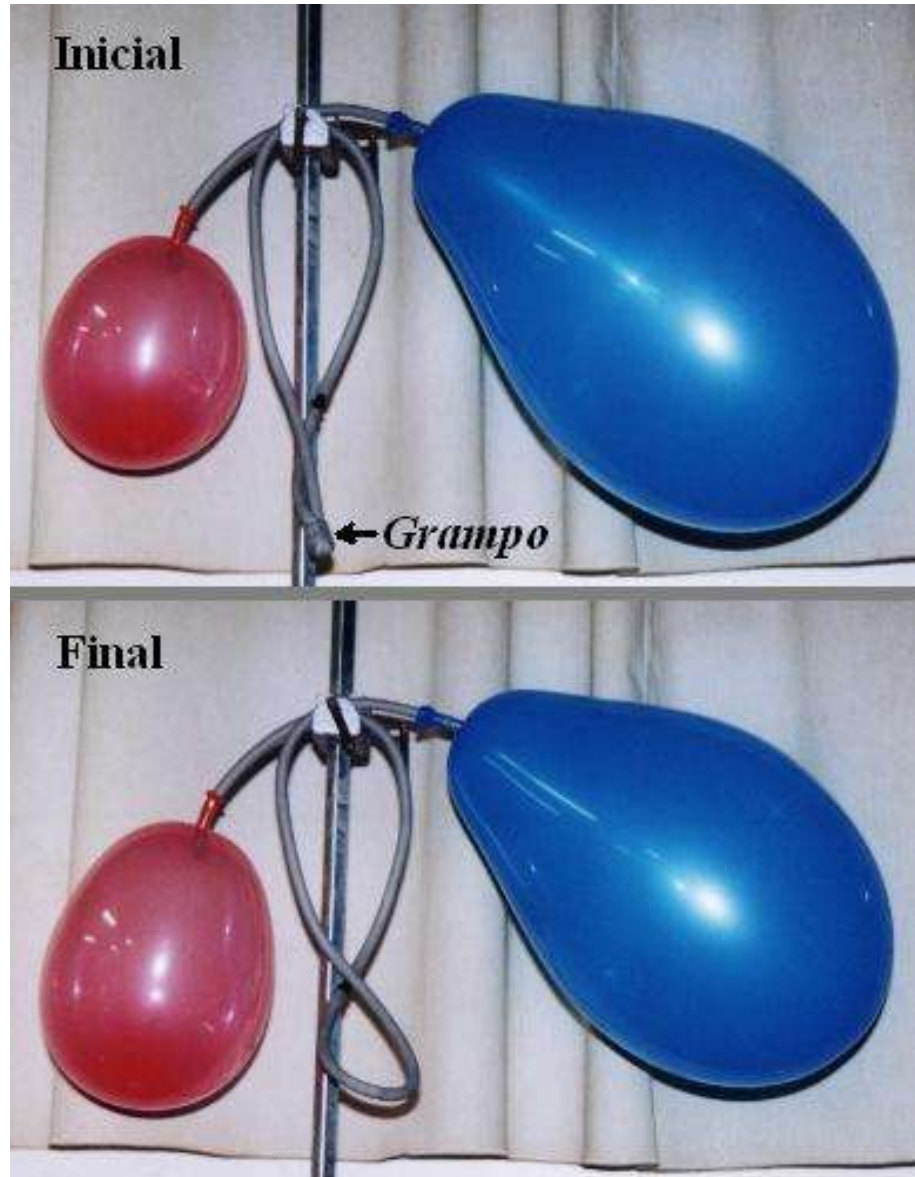


Figura 6 - Notoriamente o ar flui do balão maior para o balão menor.

Note que na situação particular da figura 6, os dois balões não evoluem para um estado de equilíbrio com o mesmo volume. A razão para tal comportamento está em que as borrachas sofrem, além das *deformações elásticas*, *deformações plásticas*⁵ (Yavorski e Detlaf, 1972). A existência de *deformações plásticas* se constata quando um balão cheio é completamente desinflado: ele não retoma a sua forma original.

⁵ – Uma deformação é *plástica* quando, ao se variar a tensão deformadora de tal forma que ela retome o seu valor inicial, ocorrem deformações *residuais*. Em outras palavras, as deformações não são completamente revertidas quando se reverte a tensão deformadora para o seu valor original.

A figura 7 representa a trajetória, no diagrama pressão contra volume, que o balão maior segue ao ser inflado e a seguir desinflado, transferindo ar para o balão menor. Devido às deformações plásticas, a pressão varia mais rapidamente com o volume no processo de esvaziamento do que no processo de enchimento do balão.

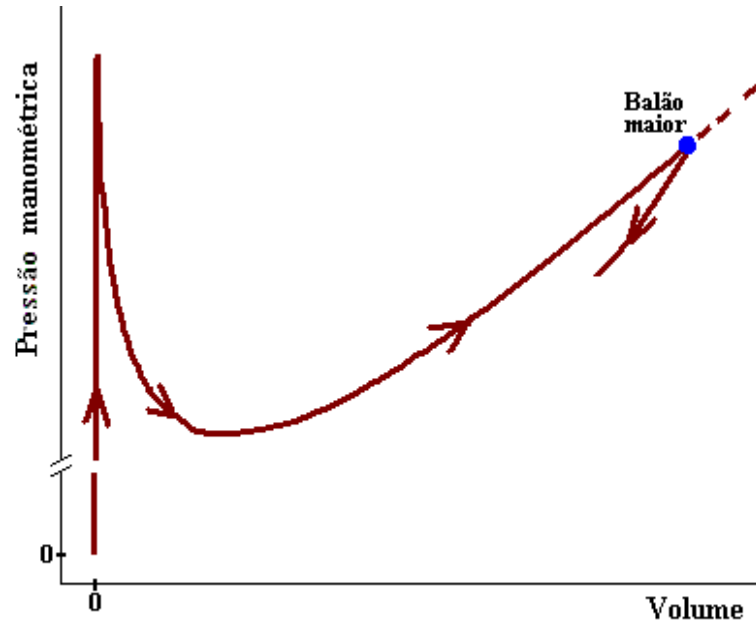


Figura 7 - Deformações plásticas no balão levam a que a trajetória no diagrama pressão versus volume ao inflá-lo seja diferente do que ao desinflá-lo.

Na figura 8 estão representadas, em linha contínua, as trajetórias que os dois balões seguem após a mangueira ser desobstruída. Os estados de equilíbrio dos dois balões correspondem à mesma pressão, mas como as curvas para inflar e desinflar um balão são diferentes, devido às *deformações plásticas*, eles atingem o equilíbrio com volumes desiguais um em relação ao outro.

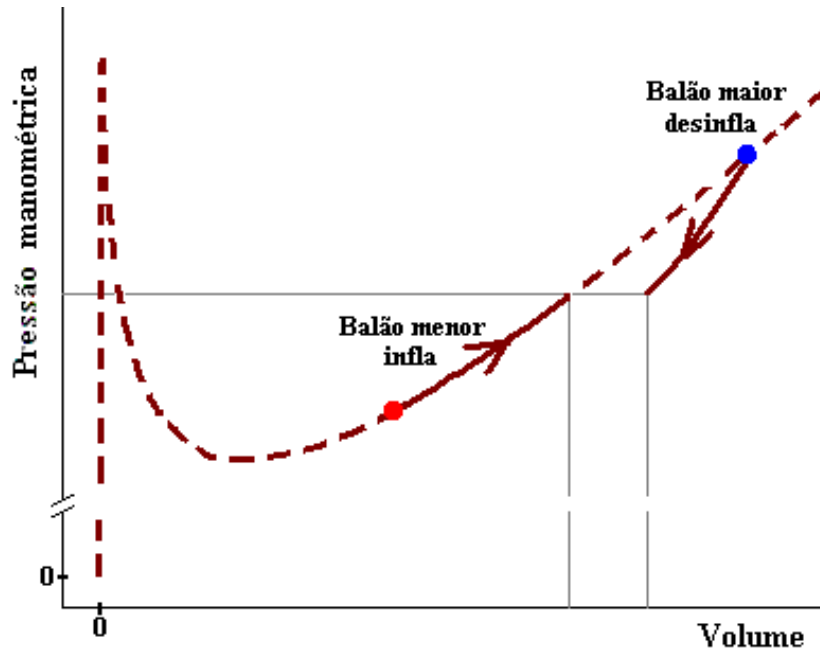


Figura 8 - Trajetórias no diagrama pressão versus volume levam a que os dois balões atinjam o estado final de equilíbrio com volumes diferentes entre si.

5. Conclusão

Prever como varia o volume dos dois balões conectados entre si não é um desafio tão trivial quanto parece. As propriedades elásticas da borracha e os volumes iniciais dos dois balões determinam em que sentido ocorrerá a troca de ar entre eles. Demonstramos que a possibilidade contra-intuitiva de passar ar do balão menor para o maior pode ser facilmente concretizada na prática. Igualmente provamos que pode passar ar do balão maior para o menor e que quando isto ocorre, os volumes finais dos dois balões não costumam ser iguais, aliás, geralmente não são. Pode ainda acontecer que dois balões com volumes diferentes, ao serem conectados, não troquem ar entre si e, portanto permaneçam com volumes inalterados. Esta possibilidade ocorre quando, ainda com a mangueira obstruída, as pressões no interior dos dois balões são iguais (o leitor facilmente imaginará nos diagramas pressão contra volume uma infinidade de estados iniciais para os dois balões, que apesar de possuírem volumes diferentes, estão à mesma pressão).

O objetivo de utilizarmos em nossas aulas a demonstração experimental do comportamento do sistema constituído pelos dois balões, principalmente no que tange à possibilidade contra-intuitiva de fluir ar do balão menor para o maior, é de motivar os alunos para uma análise mais aprofundada dos conceitos termodinâmicos e dos mecanismos envolvidos neste sistema.

Para o leitor interessado em uma abordagem mais rigorosa do problema dos dois balões, sugerimos consultar outro trabalho nosso sobre esse tema (Levin e Silveira, 2004).

Agradecimentos. Agradecemos à Prof^a Maria Cristina Varriale, do IM-UFRGS, e ao Prof. Rolando Axt, do DEFEM/UNIJUÍ, pela leitura crítica deste artigo e pelas sugestões apresentadas.

Bibliografia

LEVIN, Y. e SILVEIRA, F. L. Two rubber ballons: phase diagram of air transfer. *Physical Review E*, 69, 051108, 2004.

SAVELIÉV, I. V. *Curso de física geral 1*. Moscou: MIR, 1984.

YAVORSKI, B. M. e DETLAF, A. A. *Manual de física*. Moscou: MIR, 1972.

Anexo

Procedimento experimental para a determinar a pressão e o volume em um balão de festa

Para determinar a *pressão manométrica* no interior de um balão de festa utilizamos um *manômetro de tubo aberto*, que consiste em um tubo em U contendo água (vide a figura 9). Conforme se observa nessa figura, um dos ramos do manômetro está conectado ao balão, o qual também se encontra ligado ora a uma seringa, ora a uma pequena bomba de ar, por intermédio de uma derivação da mangueira.

O balão foi inflado, inicialmente, injetando-se ar em doses de 20 cm^3 com o auxílio da seringa. Posteriormente, com a pequena bomba, doses de aproximadamente 50 cm^3 de ar foram introduzidas no balão. A cada dose de ar injetado com a seringa, era feita a leitura da *pressão manométrica*. Por outro lado, a bomba foi bombeada várias vezes entre uma leitura e outra; portanto os acréscimos de volume⁶ são bem maiores do que no trecho inicial. Note que a sucessão dos primeiros pontos experimentais representados na figura 2 indica que a pressão atingiu um máximo de cerca de $3,1 \text{ cm Hg}$ (cerca de $42 \text{ cm H}_2\text{O}$) quando o volume era de apenas 60 cm^3 . Nessa faixa da curva, a variação de pressão é muito sensível a pequenas variações no volume, e por isso utilizamos a seringa.

⁶ - Os volumes de ar injetados no balão e medidos ora com a seringa, ora com a bomba, são conhecidos à pressão atmosférica. Quando o ar é bombeado para dentro do balão, acaba ocupando um volume um pouco menor do que no interior da seringa e da bomba, pois a pressão no interior do balão é levemente maior do que a pressão atmosférica (no máximo cerca de 4% superior à pressão atmosférica). O volume que o ar bombeado para dentro do balão efetivamente ocupou no interior dele foi corrigido através da *lei de Boyle*, levando em consideração esse acréscimo de pressão.

A fotografia 1 da figura 9 mostra o sistema experimental no estágio em que a pressão no balão atingiu o valor máximo de cerca de 3,1 cm Hg (cerca de 42 cm H₂O); as setas brancas indicam os níveis da água no *manômetro de tubo aberto*.

A segunda fotografia da figura 9 apresenta o sistema experimental quando a pressão no balão atingiu o mínimo valor de 1,6 cm Hg (aproximadamente 22 cm H₂O). Nessa situação o volume que o balão ocupava era cerca de 1/4 do volume que o levou à ruptura.

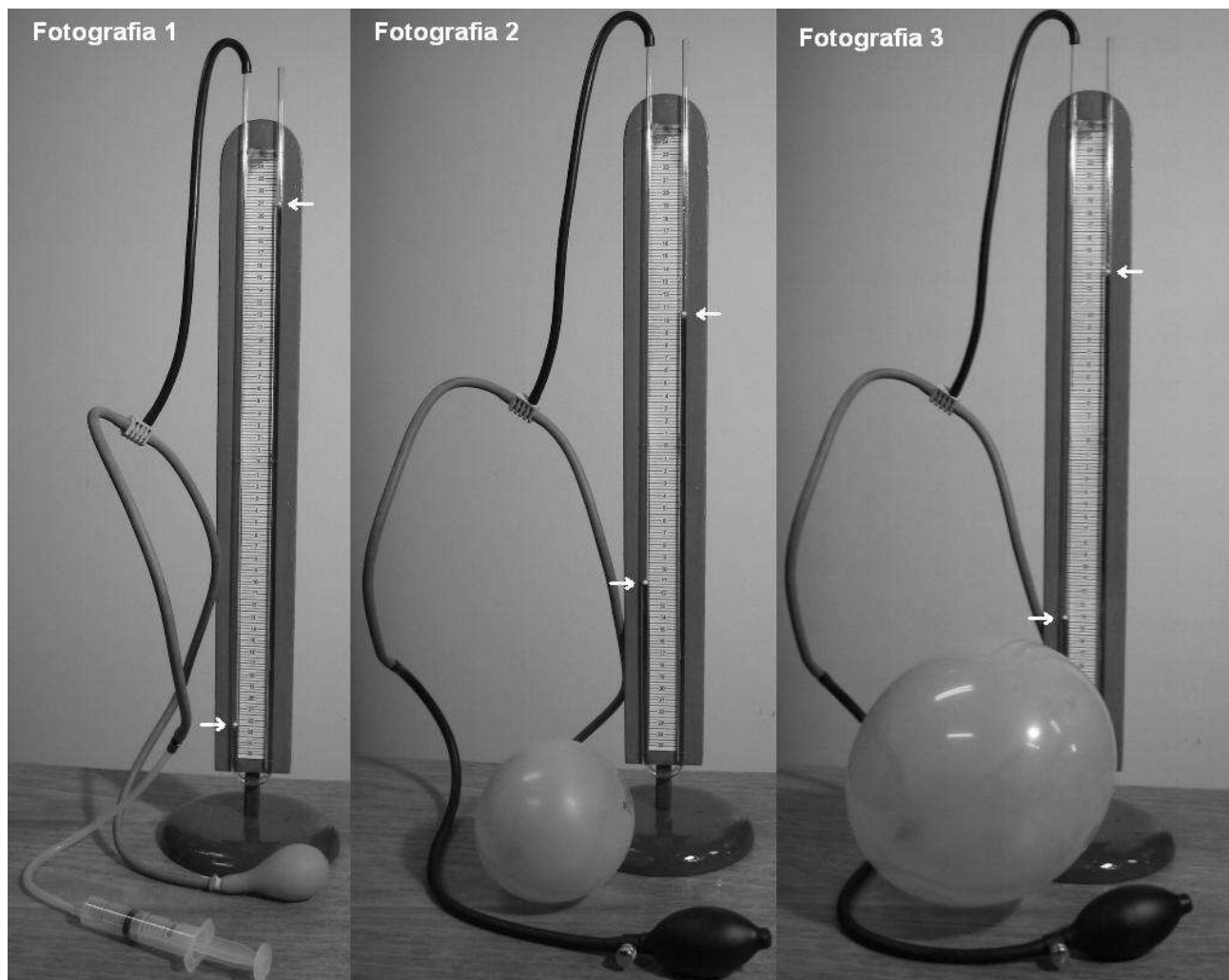


Figura 9 - Dispositivo experimental para determinar a pressão e o volume em um balão de festa.

A fotografia 3 da figura 9 mostra o balão em um estado no qual a *pressão manométrica* voltou a crescer quando se aumentava o volume do balão.

Por último, o gráfico da figura 10 representa os pontos experimentais da *pressão manométrica* no balão, em função da *raiz cúbica do volume* do balão. Esse gráfico permite observar, melhor do que na figura 2, a rápida elevação inicial da pressão. A *raiz cúbica do*

volume do balão é uma variável diretamente proporcional ao *raio médio* do balão e, portanto, este último gráfico representa a maneira como a *pressão manométrica* varia em função do *raio médio* do balão.

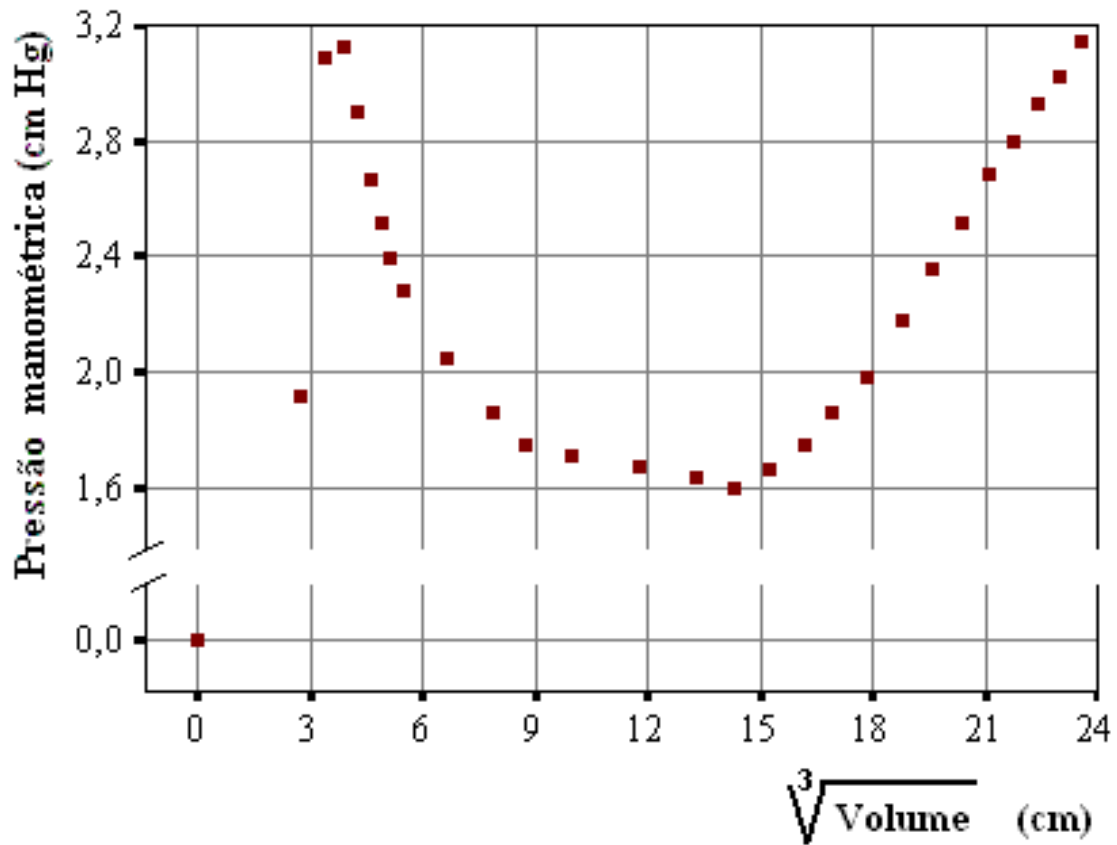


Figura 10 - Resultados experimentais para a pressão manométrica em um balão de festa em função da raiz cúbica do volume do próprio balão.