Relatório de Instrumentação para Ensino
F-809
1º semestre de 2006

Balões de Festa Desafiam Nossa Intuição

13 de junho de 2006
Aluno: Felipe Lima Magalhães
Orientador: Mário Noboru Tamashiro
Coordenador: José J. Lunazzi

Introdução:

Podemos citar na termodinâmica diversos fenômenos que contrariam a nossa intuição, como por exemplo, o fato de que se encostarmos a mão em um objeto metálico e em um outro feito de madeira, teremos a impressão de que o metálico possuirá uma temperatura menor que o de madeira. Ao se medir as temperaturas dos objetos com um termômetro percebe-se que na verdade eles possuem a mesma temperatura. Este fenômeno é explicado pelo fato de que o corpo humano é capaz de sentir apenas a taxa com que a energia é removida ou adicionada. Como o metal conduz melhor o calor do que a madeira, temos a impressão de que ele está mais frio porque perdemos energia em uma taxa maior.

Outro fenômeno que contraria a nossa intuição será descrito neste experimento como mostrado na figura abaixo. Dois balões, ambos com o mesmo tamanho original e feitos do mesmo material, são desigualmente inflados e conectados às extremidades de uma mangueira, na qual uma obstrução impede a passagem de ar.

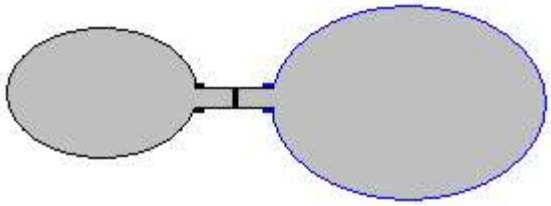


Figura 1: Dois balões conectados e desigualmente inflados.

Observa-se que quando a obstrução é removida, dependendo dos volumes iniciais ocorre um fluxo de ar do balão de menor para o de maior volume inicial, conforme mostrado na figura 2. Isso contraria as nossas expectativas, pois acreditamos que, devido ao fato da borracha estar muito mais esticada no balão maior, a pressão neste deveria ser também muito maior. Dependendo dos volumes iniciais dos dois balões pode-se observar também o fluxo de ar no sentido esperado, ou seja, do maior para o menor balão ou mesmo a ausência de fluxo, mesmo quando os raios deles são diferentes[1].

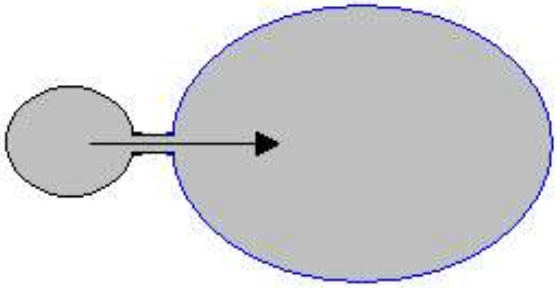


Figura 2: Fluxo de ar contraria nossas expectativas
quando removemos a obstrução.

De acordo com a termodinâmica, a variação dos volumes dos balões ocorre sempre no sentido do estabelecimento do equilíbrio termodinâmico, que neste caso, ocorre quando as pressões internas nos dois balões são iguais.

Modelo Teórico:

Materiais elásticos ao serem esticados ou comprimidos possuem a propriedade de exercerem uma força contrária F a este movimento que é proporcional à deformação sofrida pelo material, de acordo com a lei de Hooke:

(1) $F = K\Delta x$ onde Δx é a deformação longitudinal sofrida pelo objeto em relação ao comprimento de equilíbrio.

Alguns materiais, como diversos tipos de polímeros e metais em geral, apresentam uma deformação transversal à direção de aplicação da força (cisalhamento). Neste caso, se o material possuir a forma cilíndrica e uma das bases fixa e a outra sob a influência de uma força F, teremos que o comprimento do cilindro aumentará e o raio diminuirá.

Ao inflarmos um balão provocamos uma pressão no interior que é maior do que a pressão atmosférica presente no exterior. Como a força exercida no exterior pela atmosfera é menor do que a exercida pelo ar no interior do balão, ele começa a se expandir. Com esta expansão, a borracha sofre uma deformação e de acordo com a lei de Hooke enunciada acima, realiza uma força contrária a este movimento. Quando a força realizada pela atmosfera somada à força exercida pela borracha se iguala à força exercida pelo ar no interior, a expansão acaba e o balão atinge o equilíbrio em determinado volume.

Pode-se relacionar a diferença entre a pressão interna e externa no balão com o seu volume e a tensão na borracha através da Lei de Laplace-Young. Consideraremos neste experimento que o balão possui uma forma aproximadamente esférica de raio R.

Façamos um corte imaginário no balão em seu plano equatorial como mostrado na figura 3. Consideremos o equilíbrio de forças neste plano:

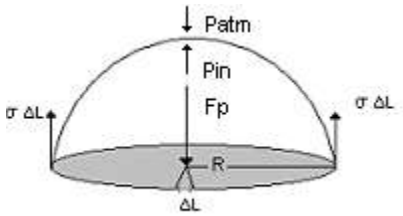


Figura 3: Equilíbrio de forças no plano equatorial de um balão esférico

Onde F_p é a força resultante no plano equatorial devido à pressão atmosférica P_{atm}, e à pressão interna P_{in}, R é o raio do balão, σ é a tensão superficial e ΔL é um segmento pequeno de circunferência. Como pressão é força dividida pela área de aplicação, para se calcular a força resultante no plano equatorial deve-se realizar uma soma vetorial de todas as forças que atuam sobre a semi-esfera. Pode-se perceber que por simetria, as componentes horizontais destas forças se cancelarão, restando apenas as componentes verticais. Desta forma, pode fazer a projeção da semi-esfera para o plano equatorial:

(4) $F_p = \pi R^2 P_{atm} - \pi R^2 P_{in} = \pi R^2 \Delta P$

onde ΔP é a pressão manométrica (diferença entre a pressão no interior do balão e a pressão atmosférica).

Cada segmento de circunferência de borracha no plano equatorial realiza uma força com modulo $\sigma\Delta L$ contrária à F_p. Se considerarmos a contribuição de todos os segmentos ΔL, temos que a força elástica total exercida pela circunferência no plano equatorial é:

(5) $F_e = -2\pi R\sigma$ onde F_e é a força elástica resultante

Como o plano encontra-se em equilíbrio mecânico, $F_e + F_p = 0$.

(6) $\Delta P = \dfrac{2\sigma}{R}$ Lei de Laplace-Young

Da lei de Laplace-Young decorre que, sendo constante a tensão superficial σ, a pressão manométrica diminui conforme se aumenta o raio de curvatura R da membrana. Em bolhas de sabão, por exemplo, a tensão superficial da mistura de água e sabão é uma propriedade exclusiva desta; independe do raio e do volume da bolha. Desta forma, quanto maior é o raio da bolha menor é a pressão manométrica no seu interior, de tal forma que quando duas bolhas se conectam e ocorre o fluxo de ar, é a bolha pequena que sempre se esvazia[2].

A borracha é um polímero de adição do isopreno (metil-butadieno-1,3) e não possui um comportamento tão bem definido quanto da mistura de água e sabão. À medida que a borracha vai sendo inicialmente esticada, a tensão aumenta linearmente de acordo com a Lei de Hooke. Entretanto, a partir de determinada deformação, ocorre mudanças de fase do polímero, que passa de um estado amorfo para uma fase intermediária e, finalmente, para uma fase na qual ocorre cristalização, representadas esquematicamente na figura 4. Como a constante elástica é uma propriedade intrínseca do polímero em determinada fase, observaremos um desvio deste comportamento linear[3].

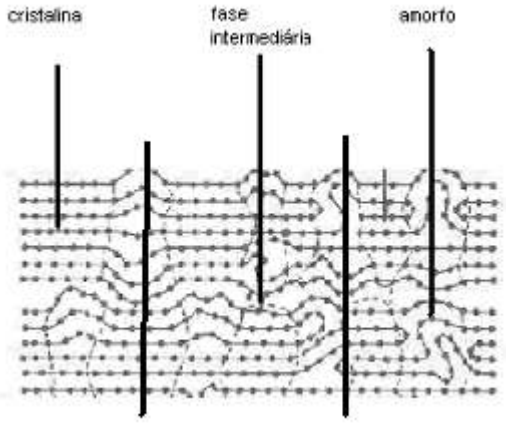


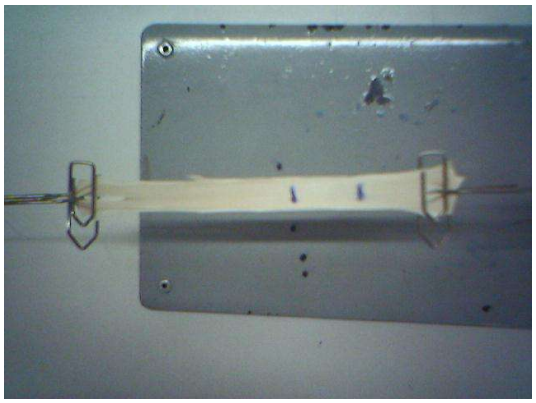
Figura 4: Alterações estruturais da borracha.

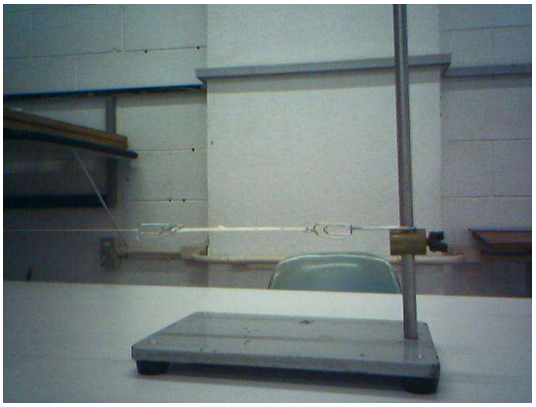
Na fase cristalina a borracha encontra-se completamente ordenada, enquanto no estado amorfo ela encontra-se completamente desordenada. Na fase intermediária temos tanto regiões ordenadas quanto desordenadas, ocorrendo, portanto coexistência.

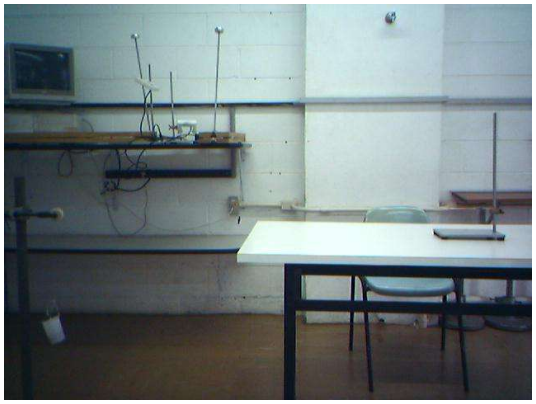
A pressão manométrica no interior do balão à medida que aumenta o seu volume depende, portanto, de como a tensão se comporta para aquela deformação.

Parte Experimental e Resultados:

Inicialmente caracterizou-se o comportamento linear da borracha ao ser deformada longitudinalmente. Cortou-se 5 tiras de borracha de aproximadamente 1cm de largura e 5cm de comprimento. Estas tiras foram presas com clipes para impedir que elas dobrassem ao serem deformadas. Prendeu-se um dos clipes em um suporte e na outra extremidade conectou-se um fio de náilon que suspendia um copo no qual eram colocadas diversas massas. Marcou-se na borracha duas linhas paralelas distantes 1cm. Desta forma pode-se caracterizar o comportamento da borracha ao ser esticada e como ocorre o retorno para a situação inicial. À medida que se alterava a massa no copo, mediu-se com um paquímetro a variação da distância entre as linhas. Utilizou-se 5 tiras de borracha para minimizar os erros e para evitar que a borracha rompesse durante o experimento. O aparato experimental pode ser visto nas fotografias abaixo:







Através da medição da deformação em função da massa colocada no copo, obteve-se o gráfico 1, mostrado abaixo:

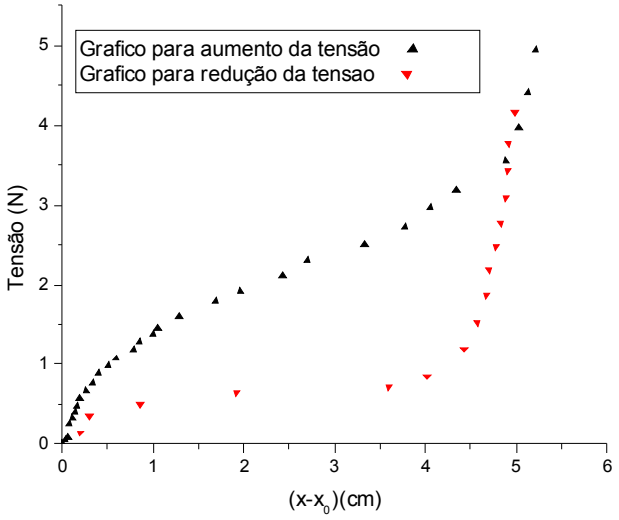


Gráfico 1: Variação da tensão em função da deformação $\Delta x = x - x_0$.

Neste gráfico observa-se claramente o fenômeno de histerese, na qual o comportamento da borracha ao ser esticada é ligeiramente diferente do comportamento ao retornar à condição inicial. Observa-se, portanto, que ela apresenta maior resistência ao ser esticada, pois no retorno à posição inicial, as massas eram retiradas do copo e praticamente nenhuma alteração era observada na distância entre as linhas paralelas. A partir de um valor limite que parece estar em torno de uma deformação de 420%, praticamente não foi preciso retirar massa, pois a borracha começou a se contrair 'espontaneamente' até um valor no qual a deformação era de apenas 50%. Neste caso é interessante mostrar que este é um estado metaestável da borracha, no qual ela possui precária estabilidade, que pode ser perturbada. De acordo com as condições, uma perturbação suficientemente elevada determinará que um sistema em estado metaestável cairá para um nível de energia mais baixo.

O estado metaestável pode ser comparado a uma pessoa no tobogã mostrado abaixo. Esta pessoa encontra-se em uma situação relativamente estável, pois pode se deslocar um pouco para frente e para trás sem escorregar definitivamente até o chão. Entretanto, se dermos um empurrão suficiente, ela deslizará morro abaixo ate atingir alguma região plana [4].

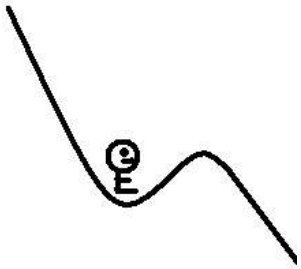


Figura 5: Estado metaestável.

Quando se coloca água pura em microondas, a temperatura pode atingir valores superiores a 100ºC, ou seja, maior que a temperatura de ebulição da água sem que a água entre propriamente em ebulição. Quando se provoca uma perturbação no liquido, como

adicionar açúcar ou agitar o copo, ele entra em intensa ebulição devido à transformação súbita de uma parte do líquido em vapor, e conseqüentemente, de um repentino aumento de volume do sistema, o que faz a água ser lançada para fora do recipiente. Neste estado metaestável a água é um líquido superaquecido.

Observam-se nitidamente comportamentos distintos durante o aumento e diminuição da tensão e para a mesma região de deformações. Até a deformação atingir 50%, a tensão parece seguir um comportamento linear, a partir do qual ela começa a seguir um comportamento também linear, entretanto, com uma inclinação bem menor, conforme mostrado no grafico1. Quando a deformação alcança os 430%, a inclinação torna a aumentar, mostrando que o estiramento começa a atingir um valor limite. Quando a deformação aproximou-se de 530% o aparato inteiro começou a apresentar instabilidade e a partir deste ponto começou-se a se retirar às massas para a determinação da curva de retorno à condição inicial.

Deve-se ressaltar que, ao submeter-se a borracha a inúmeros ciclos de histerese, observa-se uma perda de suas propriedades elásticas, ou seja, ela "envelhece", ou em linguagem coloquial, ela laceia.

Percebe-se que este comportamento da borracha pode ser muito bem descrito pela lei de Hooke, entretanto para determinadas regiões de deformações, a constante elástica possui diferentes valores. De acordo com a equação (1) se fizermos um gráfico da tensão na borracha em função da deformação, a inclinação da reta fornece o valor da constante elástica em cada região.

Para realizar este ajuste, utilizamos o software Origin:

$K_1 = 2{,}0$ N/cm	com um erro $\varepsilon = 0{,}1$ N/cm	$0\text{cm} < \Delta x < 0{,}5\text{cm}$
$K_2 = 0{,}51$ N/cm	com um erro $\varepsilon = 0{,}02$ N/cm	$0{,}5\text{cm} < \Delta x < 4{,}4\text{cm}$
$K_3 = 4{,}1$ N/cm	com um erro $\varepsilon = 0{,}2$ N/cm	$4{,}4\text{cm} < \Delta x < 5{,}5\text{cm}$

Como a tensão na borracha não possui o mesmo comportamento para todas as regiões de deformação, pode-se esperar através da equação de Laplace-Young que a pressão manométrica dentro do balão possa reduzir quando o raio crescer a uma taxa maior do que a tensão na borracha. Esta região onde se espera que haja redução da pressão manométrica ocorre quando a constante elástica assume o valor de K_2. Desta forma, será possível escolher tamanhos de balões para os quais o fluxo ocorre do menor para o maior, do maior para o menor ou mesmo ausência de fluxo. Isto será discutido mais adiante na figura 7.

Para verificarmos experimentalmente o fenômeno de queda da pressão manométrica em determinados valores do raio, medimos com um barômetro a pressão dentro do balão para diversos valores de raio. Para isto, construiu-se um barômetro feito com água, conforme mostrado na figura 6, pois o balão é cheio com ar expelido pelos pulmões que são capazes de gerar diferenças de pressões ligeiramente maiores que a pressão atmosférica. Conclui-se que o peso gerado por uma coluna de água de alguns centímetros é suficiente para balancear a pressão do balão.

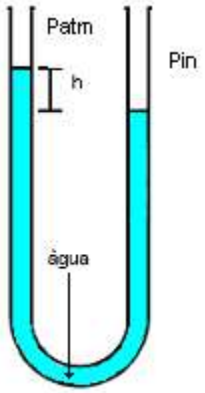


Figura 6: barômetro de coluna de água.

Utilizando o princípio de vasos comunicantes sabemos que a pressão em pontos que estão a uma mesma altura é igual, de onde se conclui que diferença de pressão deve ser balanceada pelo peso da coluna de água:

(8) $P_{in} = P_{atm} + \rho g h$ onde g é a aceleração da gravidade e ρ é a densidade da água

Como sabemos qual é a pressão atmosférica (0,99atm em Campinas), ρ = 1000kg/m^3, e a altura h é medida no laboratório com uma fita métrica, podemos determinar qual é a pressão dentro do balão.

É importante observar que o balão era cheio, conectado ao tubo e depois realizada a medição da altura h. Como o balão perde as suas propriedades elásticas rapidamente, utilizava-se um outro balão que ainda não havia sido enchido para a realização da próxima medida. Este procedimento é necessário, pois se observa no gráfico 1 o fenômeno de histerese, ou seja, o comportamento da borracha ao ser esticada é diferente do comportamento no retorno ao tamanho original. Observou-se durante o experimento que a pressão manométrica cai rapidamente durante o esvaziamento do balão, o que era esperado, pois no retorno a tensão na borracha se reduz drasticamente para pequenas alterações na deformação. O valor do raio médio foi determinado a partir da medida da circunferência da região medial do balão. Os resultados obtidos estão mostrados no gráfico 2 :

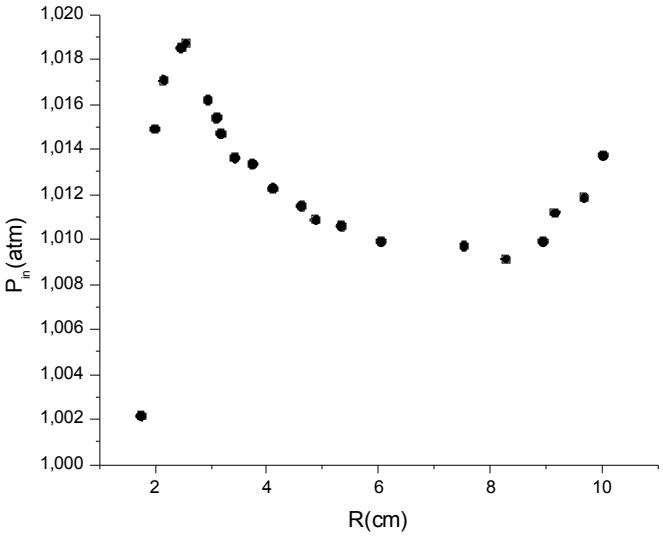


Gráfico 2 : Variação da pressão interna em função do raio médio do balão

Percebe-se claramente no gráfico acima que ocorre queda da pressão interna quando o raio ultrapassa os 3cm e volta a subir quando o raio atinge o valor de 8cm. Se enchermos

um balão de tal forma que seu raio seja de 3cm (no qual a pressão é de aproximadamente 1,019 atm) e o conectarmos a um balão cujo raio é de 8cm (no qual a pressão é de 1,010 atm), o fluxo de ar será do menor para o maior balão. Porém, se ao invés de conectar um de 3cm, conectarmos um de 10 cm (no qual a pressão é de 1,014 atm), o fluxo ocorre do maior para o menor balão. Repare que se escolhermos balões com raios de 9cm e 6cm, a pressão manométrica dentro deles é igual; desta forma, não ocorre alteração nos volumes dos balões.

Na figura 7 abaixo se representou, através de uma seta, o sentido do fluxo de ar para os casos mencionados acima. No caso específico em que não há seta, não ocorre qualquer fluxo. Note que não está representado o estado de equilíbrio final para os casos em que há fluxo de ar.

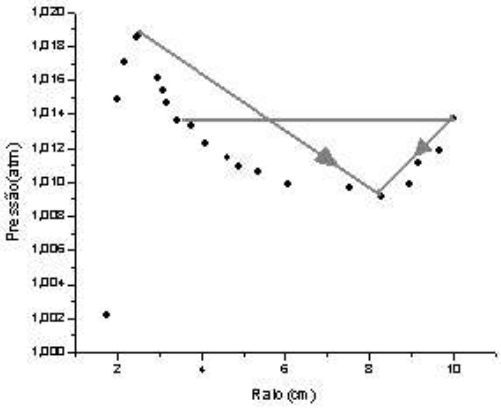


Figura 7 - Direção do fluxo de ar

Conclusões:

Prever como varia o volume de dois balões conectados não é uma tarefa tão trivial quanto parece ser à primeira vista. As propriedades elásticas da borracha e os volumes iniciais dos dois balões determinam o sentido do fluxo de ar. Neste experimento foi possível determinar o comportamento da borracha quando deformada, observando inclusive o fenômeno de histerese. Através desta caracterização e da utilização da lei de Laplace-Young, analisou-se a variação da pressão interna em função do raio médio do balão, o que permite criar três situações distintas. A primeira na qual o balão menor desinfla, a segunda na qual o maior desinfla como intuitivamente esperado e uma terceira situação na qual, apesar dos balões possuírem raios diferentes, praticamente não há alteração dos volumes.

Este experimento visa incentivar os alunos duvidar e questionar criticamente raciocínios intuitivos, motivando uma análise mais aprofundada dos conceitos termodinâmicos.

Comentários do Coordenador:

Soube por você que fez o experimento com sucesso, coisa que faltou colocar no relatório. Também precisa expandir a descrição de maneira que um leigo entenda coisas como o estado metaestável.

Bibliografia:

[1]Levin,Y. e Silveira, F.L. Two rubber ballons: Phase diagram of air transfer. Phys. Revi/ E **69**, 051108 (2004).
[2]
http://www.fisica.net/ensino/pressao_e_volume_em_baloes_de_festa_podemos_confiar_em_nossa_intuicao.pdf
[3]J.M.Ward, D.W.Hadley. Mechanical Properties of Solid Polymers. John Wiley & sons, 1997.
[4]http://www.if.ufrgs.br/fis183/textos/superaquec/sa.html

Referências da internet:

[4]http://www.if.ufrgs.br/fis183/textos/superaquec/sa.html

Transições de fase e experimentos com estados metaestáveis

Fernando Lang da Silveira

Instituto de Física - UFRGS

Porto Alegre - RS

Resumo

Uma substância pode se apresentar no estado líquido em temperaturas superiores à do seu ponto de ebulição ou inferiores à do seu ponto de fusão. Quando isto acontece, a substância encontra-se em um estado metaestável de superaquecimento ou de superfusão e se for perturbada, por exemplo agitada, ferve ou cristaliza de imediato. Neste trabalho são descritos alguns experimentos onde se observam tais metaestados.

Palavras-chave: *Ensino de Física, termodinâmica, superaquecimento no forno de microondas, superfusão.*

I. Introdução

Em livros-texto de física geral é comum encontrar-se a afirmação de que *a água líquida, na pressão de 1 atm, se solidifica a 0ºC e ferve (entra em ebulição) a 100ºC*. Poder-

se-ia inferir daí que não pode existir água líquida, na pressão de 1 atm, com temperatura inferior a 0ºC ou com temperatura superior a 100ºC. Entretanto esta inferência seria incorreta. O *estado líquido* pode existir a temperaturas superiores à do *ponto de ebulição* e a temperaturas inferiores à do *ponto de solidificação* da substância[1] (tais possibilidades ocorrem para outras substâncias, além da água).

O objetivo deste trabalho é apresentar alguns experimentos em que se pode observar a existência do *estado líquido* acima do *ponto de ebulição* e abaixo do *ponto de fusão* da substância.

II. Superaquecimento no forno de microondas

Uma substância encontra-se *superaquecida* quando estiver no *estado líquido* a uma temperatura superior à do seu *ponto de ebulição*. O *superaquecimento* é um *estado metaestável*, isto é, um "*estado que possui precária estabilidade, podendo facilmente ser perturbado (...) uma pequena perturbação determinará que um sistema em estado metaestável cairá para um nível de energia mais baixo"* (Isaacs, 1991; p. 172).

Para se obter água *superaquecida* há que se elevar a sua temperatura, na pressão de 1 atm, acima de 100ºC, sem que ocorra a *ebulição*. O aquecimento da água em um recipiente em contato com uma chama não permite que ocorra o *superaquecimento*; neste processo de aquecer formam-se *correntes de convecção*, perturbando suficientemente a água para que ela entre em *ebulição* ao atingir 100ºC. Entretanto, quando a água é aquecida em um forno de microondas pode ocorrer o *superaquecimento*, isto é, a temperatura da água pode ir acima da temperatura de *ebulição* sem que a água ferva. Nas próximas três seções serão apresentados alguns experimentos simples realizados com água e com leite *superaquecidos* em um forno de microondas.

III. Detectando com um termômetro temperaturas superiores à do ponto de ebulição da água

Na figura 1 foram agrupadas duas fotos realizadas em um forno de microondas, onde "*água da torneira"* apresenta-se *superaquecida.* Para conseguirmos esse efeito retiramos o prato rotativo do forno e apoiamos o recipiente contendo água em uma tigela de sobremesa invertida, ou seja, sobre uma base estática. A retirada do prato rotativo do interior do forno de microondas permitiu que registrássemos temperaturas mais elevadas do que as atingidas quando o aquecimento era realizado sobre esse prato[2]. Na figura 1a o termômetro digital registra a temperatura de 106ºC (chegamos a medir 107ºC, entretanto não conseguimos uma foto desse estado); a introdução cuidadosa da ponteira do termômetro não alterou o estado de *superaquecimento.*

Figura 1 - Detectando temperaturas superiores a do ponto de ebulição da água.

Algumas vezes a perturbação causada pela introdução da ponteira na água deflagrou a *ebulição*. Na figura 1b pode-se observar *bolhas de vapor* que se originam na ponteira e o termômetro já registra uma temperatura de 104ºC, que é inferior à da figura 1a.

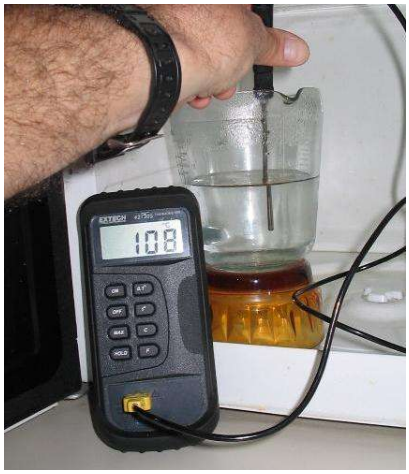


Figura 2 - Superaquecimento de água destilada no forno de microondas.

Segundo a opinião de colegas físicos teóricos, a presença de íons na água impediria o estado *superaquecido*. Entretanto como observamos anteriormente, esse estado ocorreu com "*água da torneira"*. Utilizando *água destilada* (*água deionizada* para baterias) foi alcançada a temperatura registrada na figura 2. O termômetro indica 108ºC (chegamos a observar 109ºC, entretanto não conseguimos uma foto desse estado). Mais uma vez percebe-se que a introdução da ponteira não perturbou suficientemente o sistema a ponto de destruir a *metaestabilidade*. Os experimentos mostram que o estado *superaquecido* possui uma estabilidade maior do que aquela sugerida pela citação feita anteriormente neste trabalho: "*estado que possui precária estabilidade, podendo facilmente ser perturbado"* (Isaacs, 1991; p. 172; grifo nosso).

IV. Explosão da água superaquecida

Na figura 3a vê-se o recipiente com água *superaquecida*, imediatamente após a abertura da porta do forno de microondas. A seguir, na figura 3b uma colher foi introduzida na água, produzindo uma perturbação que levou o líquido a irromper em intensa *ebulição*. Devido à transformação súbita de uma parte do líquido em vapor, e conseqüentemente, de um repentino aumento de volume do sistema, a água é lançada para fora do recipiente. Ao se medir a temperatura após a explosão, constata-se que ela já é levemente inferior a 100ºC. A transição de líquido para vapor requereu uma quantidade de energia considerável; lembremos que cada grama de água que passa do *estado líquido* para o *estado de vapor* necessita receber cerca de 2300 J de energia. A conseqüência da absorção desta quantidade de calor pela água que vaporizou foi uma rápida diminuição da temperatura da massa líquida restante.

Figura 3 - Explosão da água superaquecida quando uma colher é introduzida no líquido.

Um evento como o registrado na figura 3 pode facilmente acontecer com um usuário do forno de microondas. Se sua mão estiver próxima ao recipiente, será atingida por água fervente. Na fotografia percebem-se grandes gotas de líquido sendo lançadas para fora do forno e, portanto, com alcance suficiente para atingir a mão de alguém, eventualmente até seu rosto.

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

Pressure and volume in party ballons: 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 ballons: 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 $\mathbf{p_1}$, está menos inflado do que o da direita, que se encontra a uma pressão $\mathbf{p_2}$. 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?

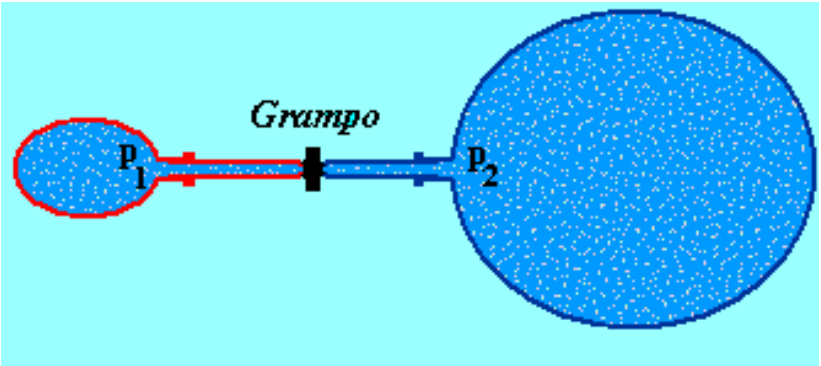


Figura 1 – Dois balões ligados a uma mangueira que está obstruída por um grampo.

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 mercúrio[1] (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 bolha[2]. Logo que duas bolhas de sabão aderem uma na outra, e se interconectam

[1] – Quando sopramos 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 final[3].

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).

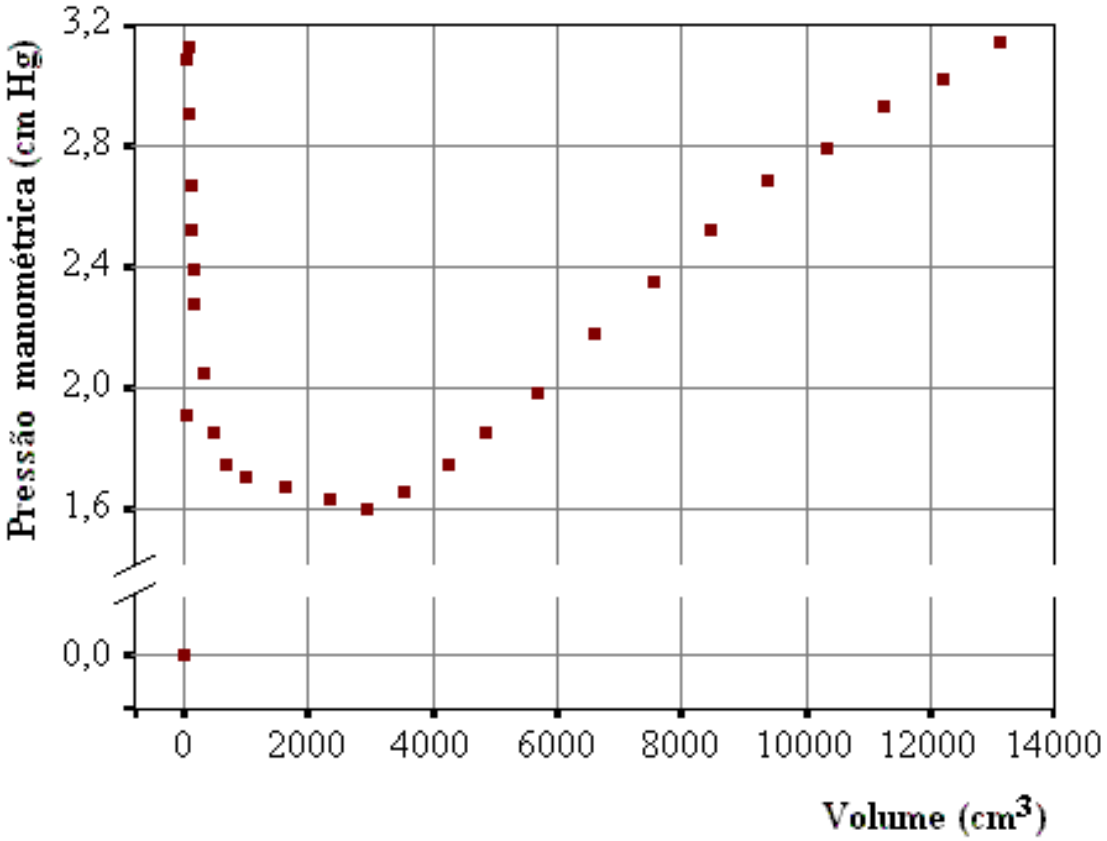


Figura 2 - Resultados experimentais para a pressão manométrica em um balão de festa em função do volume do próprio balão.

O experimento foi levado a efeito até a ruptura do balão, o que aconteceu a um volume máximo de aproximadamente 13000 cm^3. Observa-se que inicialmente, com um volume muito pequeno (cerca de 20 cm^3), a *pressão manométrica* era 1,9 cm Hg e atingiu o valor máximo de 3,1 cm Hg quando o volume era apenas 60 cm^3. 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 diminuiu[4], sendo que um mínimo de pressão igual a 1,6 cm Hg aconteceu quando o volume do balão era cerca 3000 cm^3 (cerca de 1/4 do seu volume máximo). Para volumes acima de 3000 cm^3, 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.

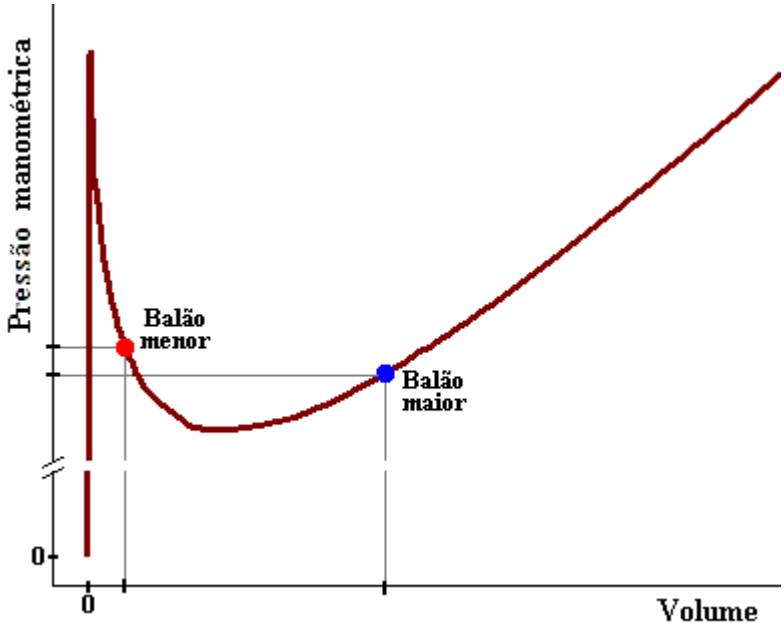


Figura 3 - Um exemplo de estados possíveis para dois balões antes da retirada do grampo que obstrui a mangueira de conexão.

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 sopramos 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 cm^3, é superior às pressões que se verificam para volumes maiores. Note na figura que até cerca de 13000 cm^3 de volume, a pressão se mantém inferior a 3,1 cm Hg.

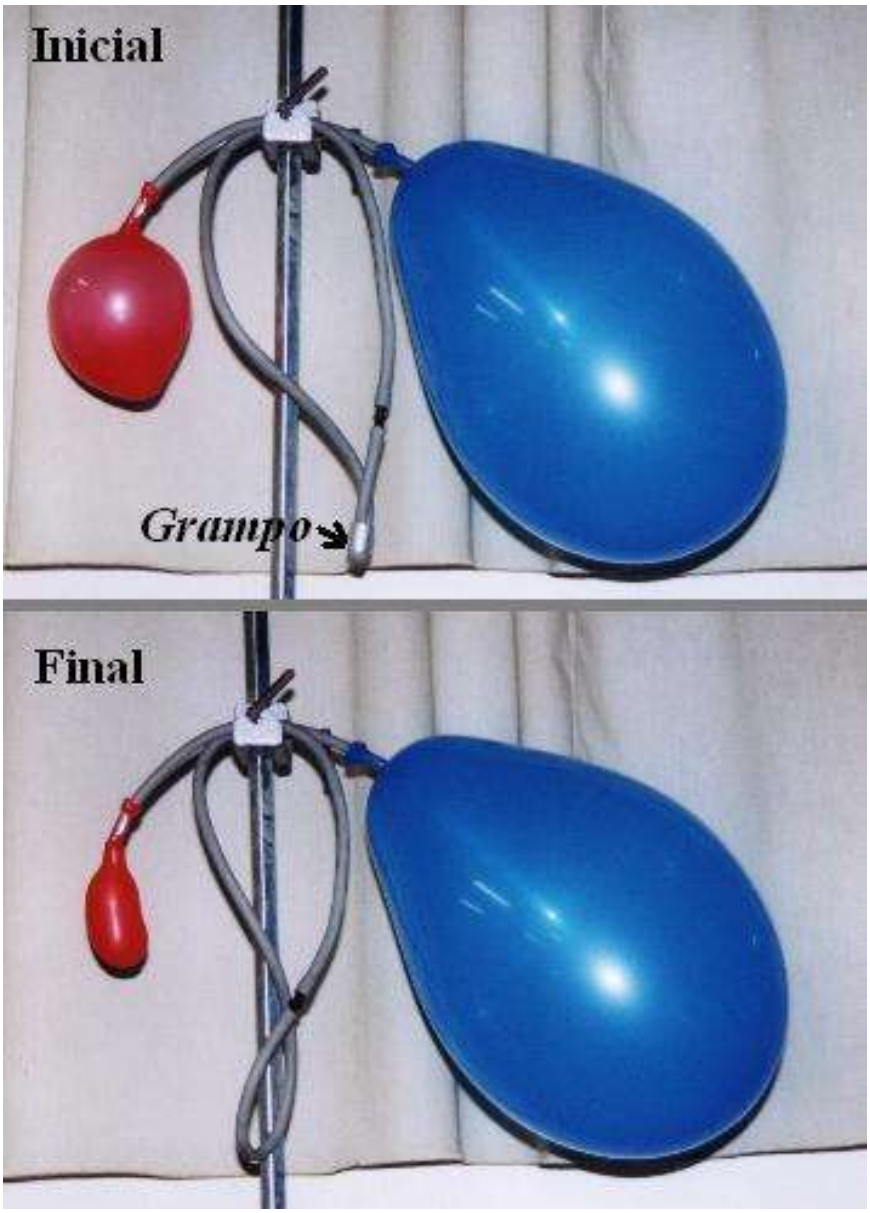


Figura 4 - Notoriamente o ar flui do balão menor para o balão maior.

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.

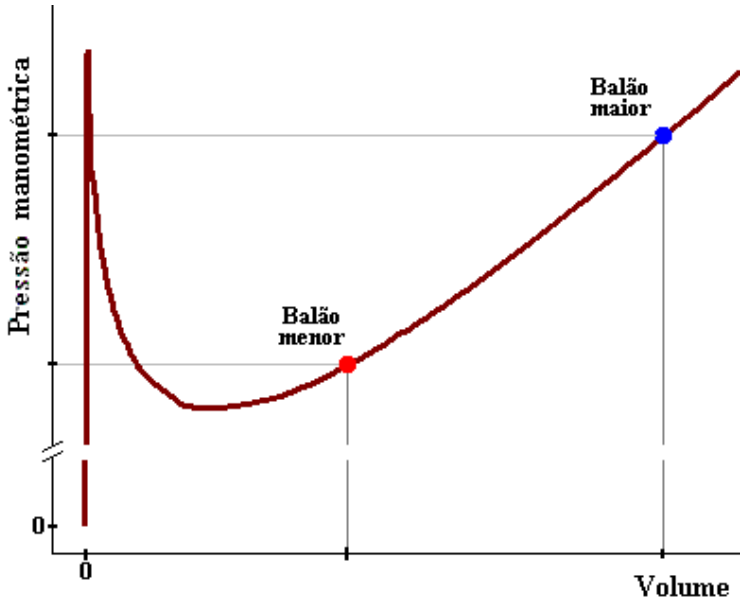


Figura 5 - Outro exemplo de estados possíveis para dois balões antes da retirada do grampo que obstrui a mangueira de conexão.

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.

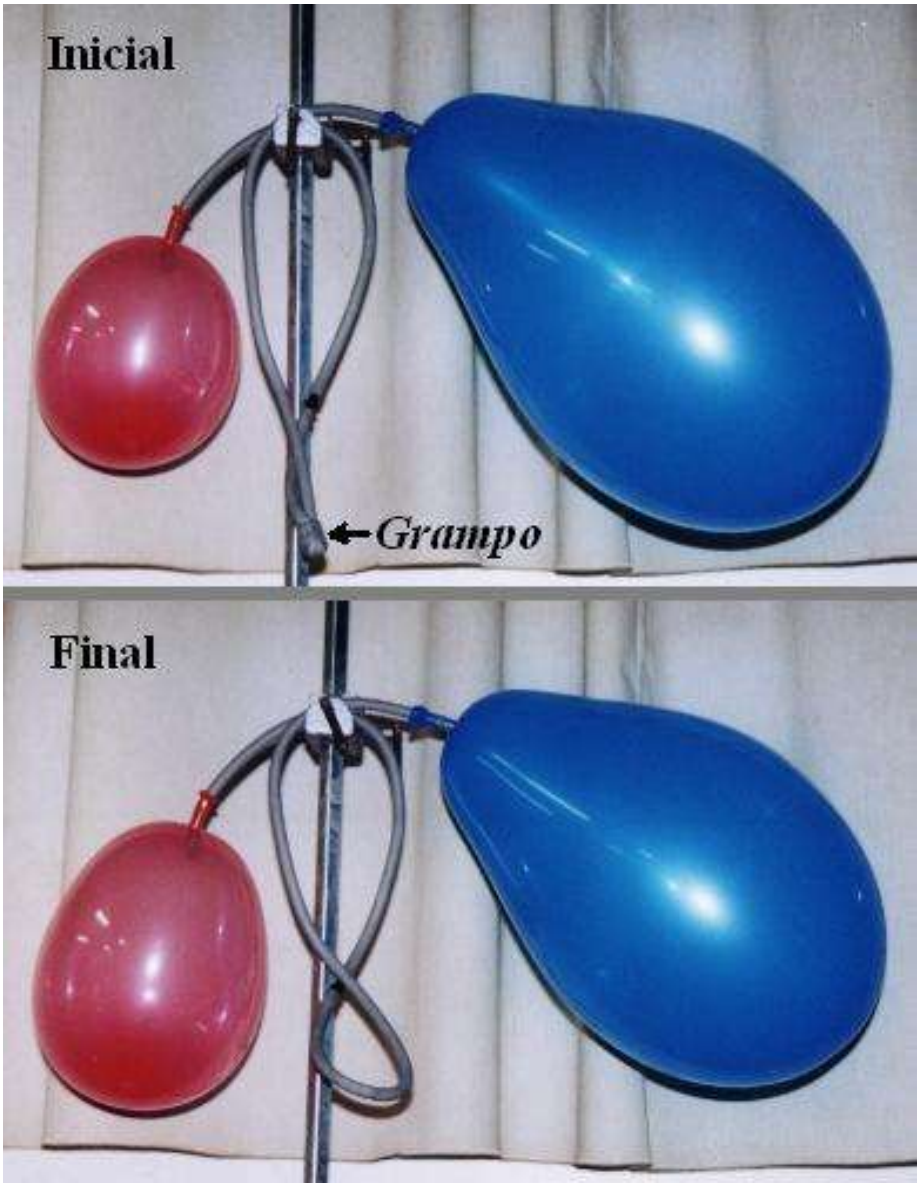


Figura 6 - Notoriamente o ar flui do balão maior para o balão menor.

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.

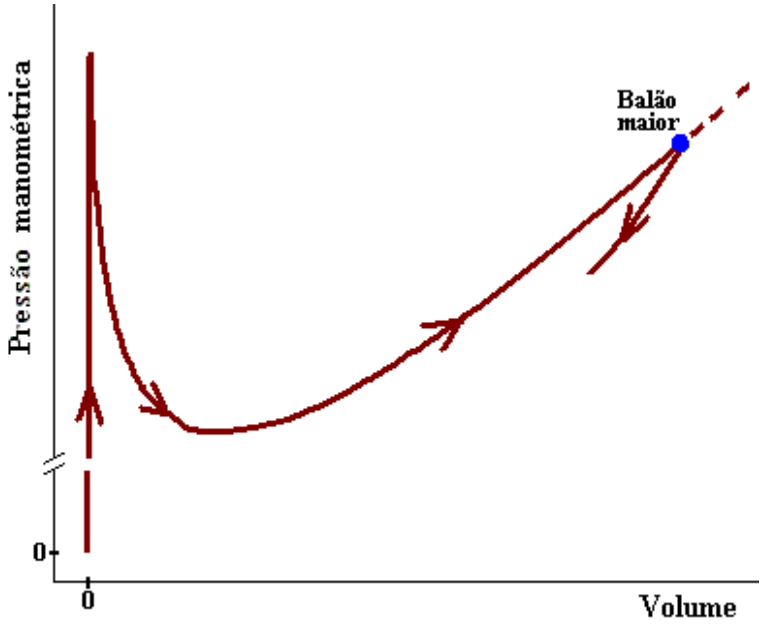


Figura 7 - Deformações plásticas no balão levam a que a trajetória no diagrama pressão versus volume ao inflá-lo seja diferente do que ao desinflá-lo.

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.

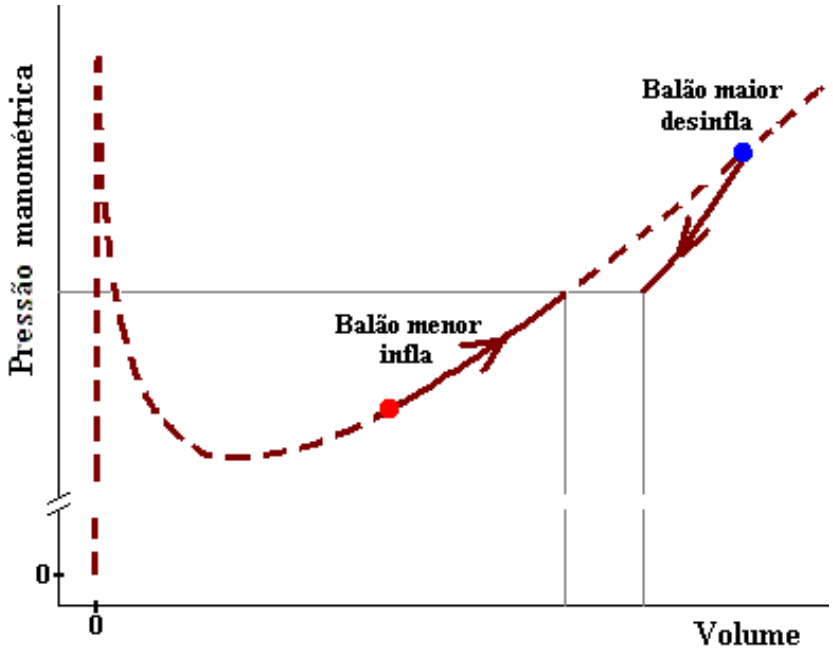


Figura 8 - Trajetórias no diagrama pressão versus volume levam a que os dois balões atinjam o estado final de equilíbrio com volumes diferentes entre si.

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 Profª 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 volume[6] 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 cm Hg (cerca de 42 cm H_2O) 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 H_2O); 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 H_2O). Nessa situação o volume que o balão ocupava era cerca de 1/4 do volume que o levou à ruptura.

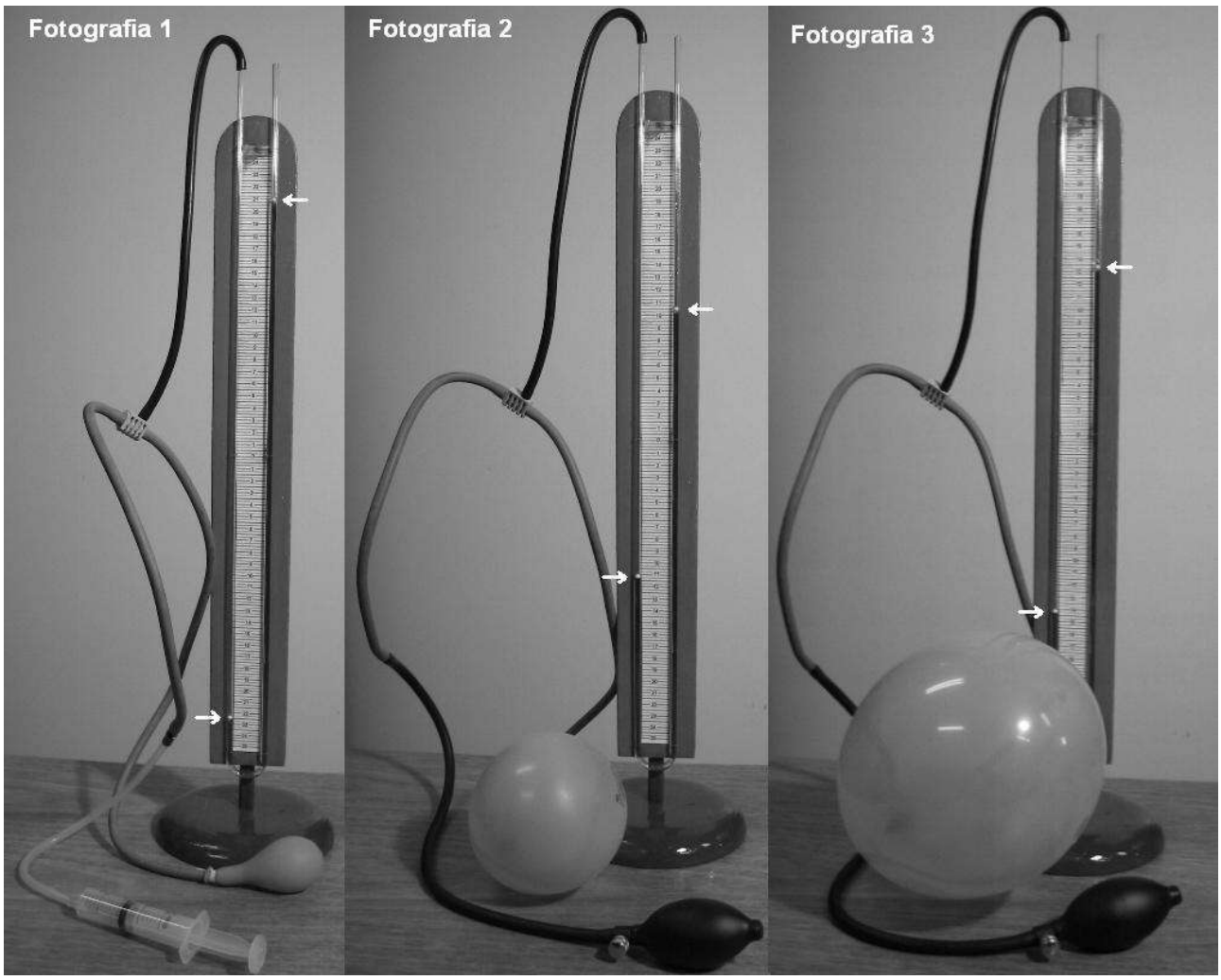


Figura 9 - Dispositivo experimental para determinar a pressão e o volume em um balão de festa.

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.

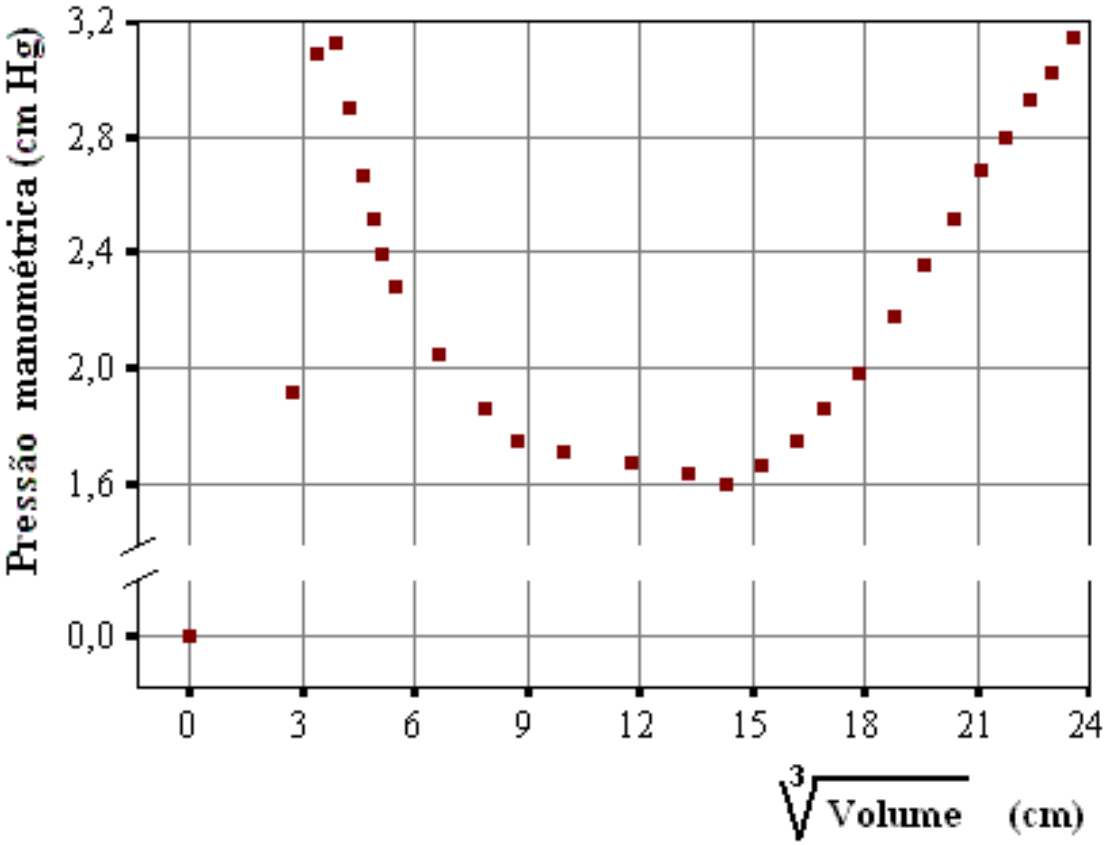


Figura 10 - Resultados experimentais para a pressão manométrica em um balão de festa em função da raiz cúbica do volume do próprio balão.