

MATERIAIS E MÉTODOS

DISCOS SUSTENTADOS POR COLCHÃO DE AR: UMA NOVA PROPOSTA*

Roberto Hessel

UNESP - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro

Os discos sustentados por colchão de ar têm encontrado larga aplicação didática. Sua utilização, contudo, esbarra em algumas dificuldades, pois os sistemas convencionais que permitem registrar suas trajetórias e fornecer o gás para sustentá-los tornam difícil e dispendioso o seu emprego. Neste trabalho pretende-se mostrar duas montagens alternativas que permitem evitar esses inconvenientes.

Introdução

Os equipamentos didáticos que utilizam o princípio de sustentação a ar despertaram grande interesse, principalmente nos Estados Unidos, a partir de um artigo de Marcle¹ publicado em 1960.

O desenvolvimento desses equipamentos representa, na opinião de Meiners², "um dos avanços mais significativos em direção aos aspectos experimentais da mecânica que resultou, em escala mundial, do renascimento no ensino das Ciências Físicas". Em particular os discos que deslizam quase sem atrito sobre uma superfície plana (conhecidos como "pucks") e sustentados por um colchão de ar (ou outro gás) começaram a ser largamente utilizados em demonstrações e estudos de movimentos em duas dimensões e tornaram possível a realização de inúmeras experiências que eram impraticáveis até então.

Segundo Whitney³, os primeiros discos sustentados por colchão de ar foram construídos por Marcle⁴ e por ele mesmo, em 1957, para experiências de conservação de quantidade de movimento destinadas a alunos do Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Depois disso apareceram outras aplicações do princípio da sustentação (ou lubrificação) a ar. As mais significativas foram as invenções do trilho⁵ e da mesa de ar⁶.

Em 1964 Whitney⁷ publica um artigo sobre a teoria dos dis

*Este trabalho é um resumo parcial de uma dissertação de mestrado desenvolvida sob a orientação do prof. Dr. Dietrich Schiel, a quem o autor agradece, e apresentada no IFQ de São Carlos-USP para a obtenção do título de "Mestre em Física Aplicada".

cos sustentados por colchão de ar que mostra, entre outras coisas, como calcular a pressão mínima para sustentar um dado disco, como varia a espessura da película de gás em função do fluxo e como calcular a resistência oposta pela película ao movimento do disco. A partir desse trabalho tornou-se possível projetar pucks com as características que se desejar.

É interessante notar que a lubrificação a ar não era uma idéia nova quando esses discos surgiram pela primeira vez. Os laboratórios didáticos do MIT, por exemplo, já haviam construído em 1953 um giroscópio cujo rotor era sustentado por colchão a ar⁸.

Segundo Gross⁹, aparentemente foi o francês G. Hirm quem, em 1854, mencionou pela primeira vez que o ar poderia ser empregado como lubrificante. Depois disso o assunto voltou a ser discutido, por exemplo, em 1897, quando o americano A. Kingsbury construiu o primeiro mancal radial lubrificado a ar. Contudo, foi somente a partir de 1950, quando a indústria passou a necessitar de lubrificantes com características muito especiais¹⁰, que o estudo e aplicação da lubrificação a ar se aceleraram. A Marcley e a Whitney cabe o mérito, nos parece, por terem imaginado um dispositivo suficientemente interessante para chamar a atenção e mostrar o alcance didático dessa forma de lubrificação.

O funcionamento de um puck

A fig. 1 mostra os aspectos essenciais de um puck. Seu corpo é um disco cilíndrico, geralmente de metal, que tem um pequeno orifício ao longo do eixo vertical passando pelo seu centro. Concêntrico com esse orifício há um tubo preso à superfície superior do disco que serve para admitir o ar. Forçado através do tubo, o ar sai pelo orifício inferior escapando por entre o disco e a mesa. A estreita camada de ar assim formada é capaz de levantar o disco inteiramente da superfície e mantê-lo suspenso (uma pressão mínima é necessária para que isso aconteça¹¹). Uma vez flutuando e posto em movimento, o disco pode deslocar-se em qualquer direção num plano horizontal encontrando apenas uma pequena resistência imposta pela camada de ar sobre a qual desliza.

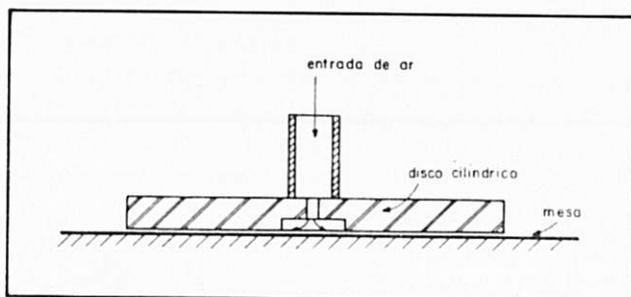


FIG. 1 - Corte longitudinal de um puck.

No modelo construído por Marcle y e Whitney (fig. 2a) o ar é fornecido por meio de uma linha de distribuição do laboratório através de uma mangueira leve e flexível encaixada no tubo vertical solidário ao disco (por isso receberam a denominação de pucks "cativos"). Em outros modelos o puck pode vir provido com o seu próprio reservatório de gás. Anderson¹², por exemplo, construiu um puck provido de um reservatório que pode ser preenchido com ar comprimido através de uma válvula de pneu de bicicleta (fig. 2b). O Physical Science Study Committee (PSSC) utiliza pucks sustentados por CO_2 que é obtido a partir da sublimação de gelo seco (fig. 2c). De maneira semelhante o Instituto de Física da USP utilizou, para realizar uma série de seis filmes sobre o Centro de Massa¹³, discos sustentados por nitrogênio obtido a partir da evaporação de nitrogênio líquido (fig. 2d).

Já mais recentemente a firma inglesa Griffin & Geroge Ltd lançou no mercado um puck cuja sustentação é garantida pelo ar fornecido por uma pequena bomba solidária ao disco e acionada por um motor elétrico alimentado por pilhas. A versão mais simples, entretanto, utiliza um balão de borracha como reservatório de ar¹⁴. Supreendentemente, com um desses balões pode-se sustentar um disco de 800 g e diâmetro de 16 cm a 18 cm por cerca de um minuto.

O registro das posições de um puck em movimento pode ser feito através da fotografia de múltipla exposição ou com a utilização de um faiscador eletrônico, que emite pulsos de alta tensão com frequência bem determinada, e uma folha de papel apropriado que é perfurada pelas faíscas¹⁵.

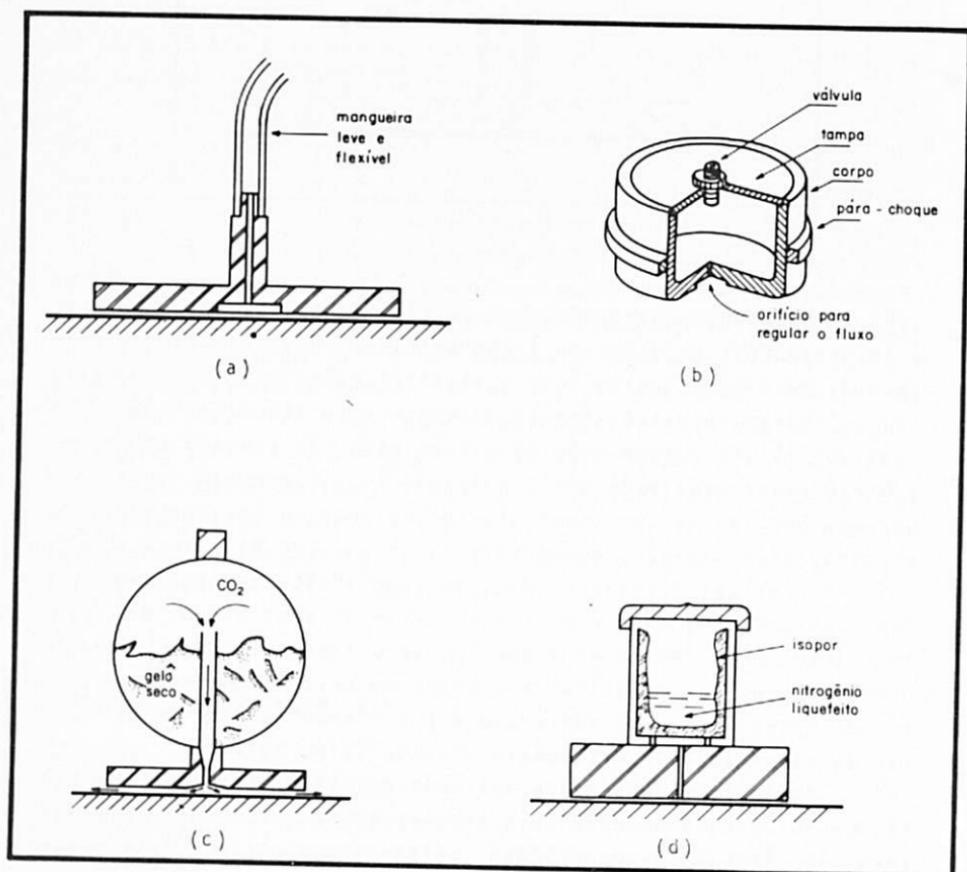


FIG. 2 - a) Puck cativo. b) Puck com reservatório de ar comprimido. c) Puck de gelo seco. d) Puck de nitrogênio liquefeito.

A nosso ver os sistemas atualmente adotados a fim de obter o gás para a sustentação dos discos e registrar suas trajetórias têm impedido uma utilização mais ampla desse tipo de equipamento, principalmente entre nós, pois não é muito fácil dispor de todo o material necessário para realizar experiências com pucks. Neste trabalho pretendemos mostrar, através da descrição de duas

novas montagens, como as dificuldades associadas aos sistemas convencionais podem ser superadas.

Na primeira montagem nos preocupamos basicamente com o sistema de registro de trajetórias e, na segunda, com o registro e com a forma de garantir o ar para a sustentação. Para facilitar a exposição que se segue designaremos o primeiro puck que será descrito de P1 e o segundo de P2.

O modelo P1

A fig. 3 representa um corte longitudinal do puck P1. Uma caneta hidrográfrica montada ao longo do eixo vertical do disco tem liberdade para oscilar verticalmente sob a ação de um campo magnético criado pela bobina com núcleo de material ferromagnético. Pequenas almofadas de espuma de latex garantem a força restauradora ao sistema oscilante. A bobina é excitada através de pulsos gerados pelo circuito eletrônico da fig. 4. Esse circuito, alimentado por 3 pilhas médias de 1,5 volt, gera pulsos de tensão na forma de onda quadrada com uma frequência entre 15 e 100 hertz. A cada pulso a armadura do eletroímã, solidária à caneta, é atraída pelo núcleo da bobina, permitindo que pontos sejam marcados levemente sobre uma placa de vidro. Girando-se a peça nº 3, pode-se regular o entreferro permitindo aumentar ou diminuir a amplitude do movimento oscilatório da caneta. A altura da ponta da caneta em relação à mesa, e conseqüentemente a intensidade das marcas de tinta, é controlada segurando-se o disco e girando-se o corpo do aparelho.

O ar que garante a sustentação do disco pode ser obtido de um ou dois balões de borracha (um dentro do outro) encaixados na peça nº 1. Esses balões deverão ser enchidos com uma bomba de bicicleta com válvula (das usadas, por exemplo, para encher bola de futebol) ou bomba de papelão, à venda em alguns supermercados, para evitar a introdução de saliva no interior do aparelho.

O eletroímã (núcleo, carcaça e armadura) é construído em material de baixa magnetização remanente-ferrodoce (por exemplo, aço SAE 1020), pois deve se desmagnetizar espontaneamente toda vez que a tensão aplicada for nula. Para evitar o efeito da "colagem" da armadura com o núcleo, caso se toquem, usa-se uma arruela de 0,4 mm de espessura de material não magnético (ou pedaços de fita isolante) interposta entre os dois. O entreferro permanente, representado por essa arruela, exerce um efeito desmagne-

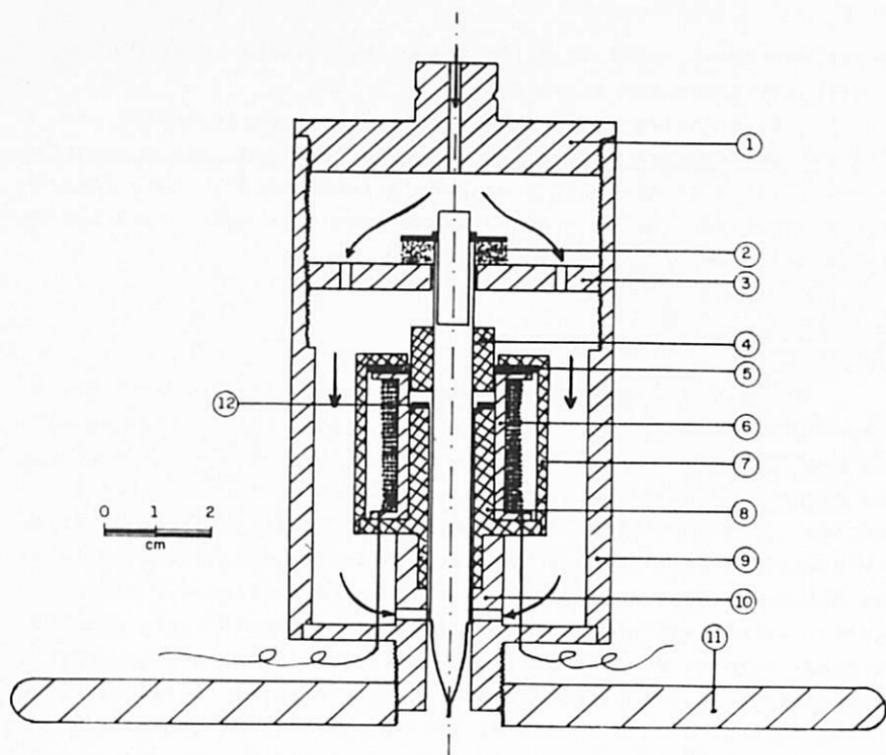


FIG. 3 - 1. Tampa. 2. Almofadas de latex. 3. Anel com rosca. 4. Armadura. 5. Anel de material não magnético. 6. Carretel. 7. Carcaça. 8. Núcleo. 9. Corpo do aparelho. 10. Luva. 11. Disco. 12. Pedacos de fita isolante.

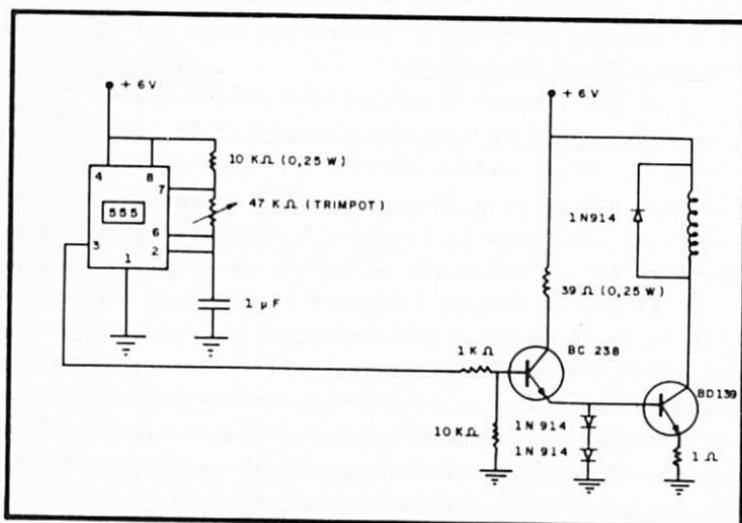


FIG. 4 - Circuito gerador de pulsos.

tizante sobre o material toda vez que o eletroímã estiver desativado. O anel de latão (peça nº 5) tem a função de impedir que a armadura toque na carcaça do eletroímã o que poderia interferir no movimento vertical da caneta. Todas as outras peças são feitas de PVC por ser fácil de ser trabalhado. Se houver algum problema com a vedação as roscas deverão ser envolvidas com fita de teflon (encontrada em lojas de ferragens e usada por encanadores).

A bobina é enrolada com 600 espiras de fio esmaltado nº 30. Este número não é arbitrário. Foi escolhido de modo que a corrente na bobina durante cada pulso de tensão (observado por meio de um osciloscópio) cresça da forma mostrada na fig. 5a, quando então o sistema eletromecânico funcionará de maneira mais eficiente. Se aumentarmos o número de espiras, aumentaremos também a indutância da bobina e, conseqüentemente, a constante de tempo indutiva do circuito. A corrente na bobina poderá, então, crescer da forma representada na fig. 5b que não é compatível com um funcionamento eficiente do sistema.

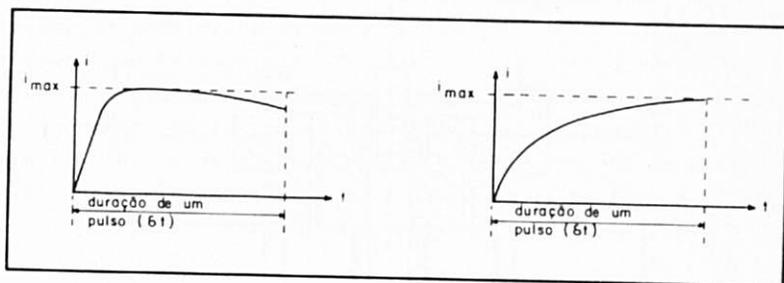


FIG. 5 a

FIG. 5 b

As dimensões do disco que utilizamos estão indicadas na fig. 6 e a massa do conjunto é de aproximadamente 800 g. A pres-

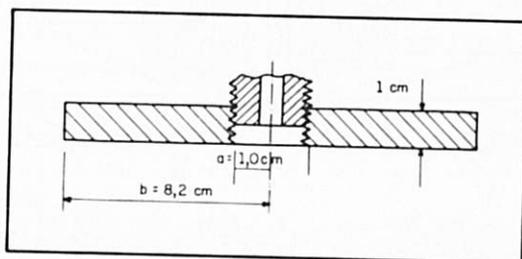


FIG. 6

são p_o na cavidade central do disco necessária para sustentar

é conveniente colocar um diodo em série com a bobina, a fim de reduzir a frequência de oscilação da caneta para a metade, ou seja, 60 Hz e aumentar a amplitude de oscilação.

A cada pulso de tensão a armadura é atraída pelo núcleo, quando então as válvulas de entrada se fecham e as de saída se abrem. O ar expulso do interior da câmara segue através do espaço existente entre carcaça e armadura, armadura e carretel e caneta e orifício central, saindo, finalmente, na base do disco.

As válvulas representadas por linguetas na fig. 7 são feitas com lâmina de latex de 0,4 mm de espessura (utilizadas por dentistas em tratamento de canal) e são fixadas nos seus lugares com cola Super Bonder.

A base da câmara pode ser girada de modo que é possível variar a espessura do entreferro e, com isso, regular o fluxo e a pressão de ar necessárias para sustentar o conjunto.

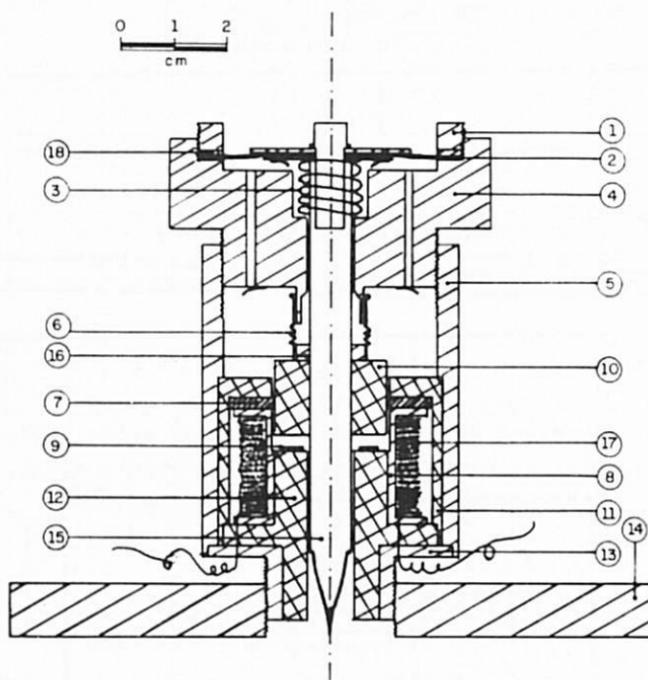


FIG. 7 - 1. Anel de PVC com rosca. 2. Lâmina de borracha de 0,6 mm (ou 0,8 mm). 3. Mola de aço. 4. Base da câmara. 5. Corpo do aparelho. 6. Retentor sanfonado. 7. Anel de material não magnético. 8. Carretel. 9. Peça de fita isolante. 10. Armadura. 11. Carcaça. 12. Núcleo. 13. Luva. 14. Disco. 15. Caneta. 16. Anel de apoio para retentor. 17. Bobina. 18. Anel de PVC sem rosca.

esse conjunto é calculada a partir da equação¹⁶:

$$p_0 = \frac{2Mg}{\pi(b^2 - a^2)} \ln \frac{b}{a} .$$

Substituindo as diversas variáveis desta equação pelos nossos dados, p_0 resulta igual a $1,6 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ ou $0,016 \text{ atm}$. Essa é a ordem da pressão reinante no interior de um ou dois balões de borracha (colocado um dentro do outro) cheios de ar, daí termos optado em usá-los. Entretanto acreditamos ser possível empregar gelo seco ou nitrogênio líquido num reservatório, desde que se façam alterações apropriadas no desenho da fig. 3.

A espessura da película de ar debaixo do disco é menor que $0,1 \text{ mm}$ e por isso bons resultados experimentais só são conseguidos se as superfícies do disco e da mesa forem bastante planas e se ambas estiverem limpas.

Um puck com essa forma pode ser empregado até em escolas secundárias. O prof. Dr. Dietrich Schiel, por sinal, já testou um exemplar semelhante ao descrito (e com bons resultados) tanto com alunos do 2º quanto do 3º grau. Entretanto a versão P1 se presta melhor para experiências em que um único puck é envolvido. Para experiências de colisões com dois ou mais pucks é interessante eliminar o balão de borracha e fazer com que as canetas dos vários pucks vibrem numa mesma frequência e, em alguns casos, em fase. Na segunda montagem veremos como isso é possível.

O modelo P2

A fig. 7 representa um corte longitudinal de um puck P2. Há duas diferenças importantes entre esta versão e a primeira descrita. Uma delas é que o balão de borracha foi substituído por uma pequena bomba de ar e a outra é que a bobina é alimentada por corrente alternada retificada. O funcionamento da parte eletromecânica é idêntico ao da primeira versão.

A lâmina de borracha presa à parte superior da caneta e a peça nº 4 formam uma câmara de ar com duas válvulas de entrada e duas de saída.

A bobina é alimentada por um transformador com uma saída de cerca de 15 volts. Como a armadura sofre a atração tanto no semicíclo positivo quanto no negativo, a frequência de seu movimento seria de 120 Hz quando ligado numa rede de 60 Hz. Assim,

O cilindro de PVC (cano de 1,5 pol.) no qual é rosqueada a base da câmara e montado todo o sistema eletromecânico pode girar sobre o disco permitindo, desta forma, regular a altura da ponta da caneta em relação à mesa e, conseqüentemente, a intensidade das marcas de tinta.

O retentor sanfonado é um pescoço de balão de borracha (peça nº 6). Sua função é impedir que o ar no interior do corpo do aparelho seja aspirado de volta para a câmara pelo movimento ascendente da membrana.

O anel de latão (peça nº 7) que serve de guia para o movimento da armadura e que a impede de tocar na carcaça, deve conter ranhuras na sua borda interior para permitir a passagem de ar e deve se ajustar tanto quanto possível à armadura (sem prendê-la), de modo a impedir deslocamentos laterais. Se isto não for observado, as forças radiais que atuam na armadura podem comprometer o movimento vertical da caneta.

A mola é feita com fio de aço de 0,7 mm de diâmetro, tem altura de 13 mm e diâmetro interno de 8 mm.

Para esta versão o carretel da bobina é enrolado com 600 espiras de fio de cobre esmaltado nº 28.

O nosso puck trabalha bem tanto com um disco de 14 cm quanto de 12 cm (de PVC ou latão). Se o disco for de latão deverá conter uma bucha de PVC no seu orifício central para rosquear na peça nº 13 que também é de PVC. As roscas das peças nº 4 e nº 13 deverão ser envolvidas com fita de teflon, com a finalidade de vedar e evitar jogo das peças que estiverem com folga.

O ar que sai da pequena bomba tem pressão suficiente para sustentar conjuntos de 0,5 a 1,5 quilogramas, se a tensão aplicada for da ordem de 15 volts.

O número de espiras, a tensão aplicada e as dimensões da câmara não são totalmente arbitrárias. No apêndice I damos uma idéia de como estimar esses parâmetros.

Tomada de dados e resultados experimentais

As experiências que serão apresentadas a seguir foram realizadas sobre uma placa quadrada de 60 cm de lado, de vidro de 6 mm de espessura, apoiada sobre outra de madeira aglomerada, dotada de três parafusos com os quais se pode nivelar a mesa. O nivelamento foi feito primeiramente com um nível de bolha e, em seguida, com o próprio puck (nivelamento fino).

Os pontos foram marcados suave e diretamente sobre o vidro e depois transferidos para uma folha de papel sulfite, pressionando-a contra as marcas de tinta (os resultados obtidos a partir de pontos marcados diretamente sobre folhas de papel, de 3 tipos distintos, não foram totalmente satisfatórios, por isso optamos pela marcação direta no vidro). Ao término de cada experiência as superfícies do vidro e da base do disco foram limpas com toalha de papel lavável (que não solta fio) e álcool.

No caso de um puck P2, os fios (leves e flexíveis) que alimentam a bobina, descem verticalmente em direção ao centro da mesa, de uma haste de 1,2 m de altura.

Experiência 1 - Movimento parabólico, num plano inclinado, de um puck P1 de 800 g. Frequência utilizada: 25 Hz.

Objetivos: Estudar um movimento em duas dimensões. Verificar as leis de lançamento de projéteis num campo gravitacional.

Inicialmente o puck desce, em "queda livre", um plano inclinado para que a direção de maior inclinação ("vertical") fique registrada sobre o plano. Em seguida é lançado para cima, numa direção distinta da "vertical", com uma velocidade v_0 .

A fig. 8 mostra o movimento obtido para um lançamento. Pode-se verificar que: i) o movimento na "vertical" é uniformemente variado e na direção horizontal uniforme, ii) o tempo gasto para subir até a altura máxima é o mesmo que para descer, iii) o alcance do projétil é o dobro da distância percorrida, na direção horizontal, até que a altura máxima seja alcançada e iv) a aceleração de "queda livre" é igual à aceleração do movimento uniformemente variado na direção vertical.

Experiência 2 - Colisão, em duas dimensões, de dois pucks P2 de massas 1229 g e 484 g.

Objetivo: Verificar em duas dimensões o Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento.

O puck mais pesado tem base de latão de 13,0 cm de diâmetro com borda arredondada. O mais leve tem base de PVC de 14,8 cm de diâmetro com borda reta.

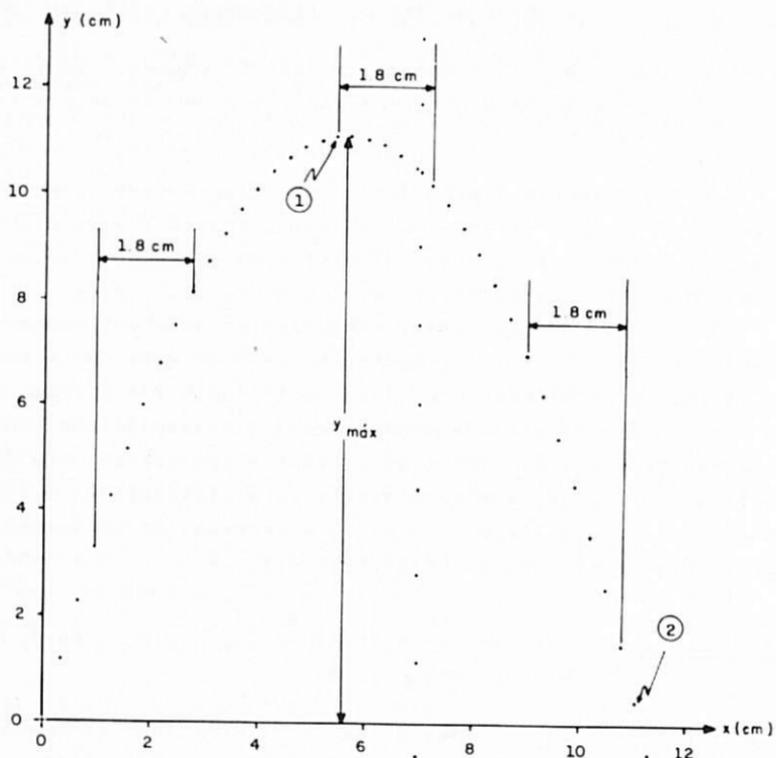


FIG. 8 - Movimento parabólico num plano inclinado. Os pontos 1 e 2, assinalados na figura, correspondem, respectivamente, às 18ª e 37ª marcas.

A fig. 9 representa uma colisão típica. Como pode ser constatado, a direção do vetor quantidade de movimento do sistema constituído pelos dois pucks antes e após o choque é praticamente a mesma e a diferença porcentual entre os módulos dos dois vetores é menor que 2,5%.

Experiência 3 - Movimento de um puck P2 de 1026 g e base de 12 cm de diâmetro sob a ação de uma força central.

Objetivo: Verificar a lei das áreas.

A fig. 10 é o registro das posições de um puck quando se movimenta num plano horizontal preso a um elástico fino (conhecido nos bazares como LASTEX). As áreas dos três setores hachurados, varridos pelo raio vetor com origem no centro de força e extremidade no centro do disco, são praticamente iguais. A diferença porcentual entre os dois valores extremos é cerca de 3%.

Conclusões

A idéia inicial de nosso trabalho era criar uma família de pucks com uma perspectiva razoável de utilização. Com relação a isso acreditamos ter atingido o objetivo pois os dois modelos propostos permitem dispensar os sistemas tradicionais para obter a sustentação (gelo seco, compressor, ...) e o registro de trajetórias (fotografia de múltipla exposição, faiscador, ...) os quais, a nosso ver, têm sido um obstáculo à utilização mais ampla desse equipamento entre nós.

Os dois pucks descritos podem ser construídos e operados com material facilmente encontrado. Com o sistema de registro idealizado a realização de cada experiência torna-se bem mais econômica que com os sistemas convencionais, pois não há necessidade de usar chapas fotográficas ou papel especial para registro de faíscas, como é costume: além disso o tempo dispendido para a obtenção dos dados é menor e as marcas são mais bem definidas que as habitualmente conseguidas com outros sistemas.

Havia, inicialmente, duas preocupações quanto ao emprego da caneta. Uma delas era a possível interferência do atrito da ponta da caneta com a mesa, que poderia prejudicar a tomada de dados, e a outra era o temor de que houvesse um afundamento da ponta (devido aos toques sucessivos na mesa) com o correr do tempo

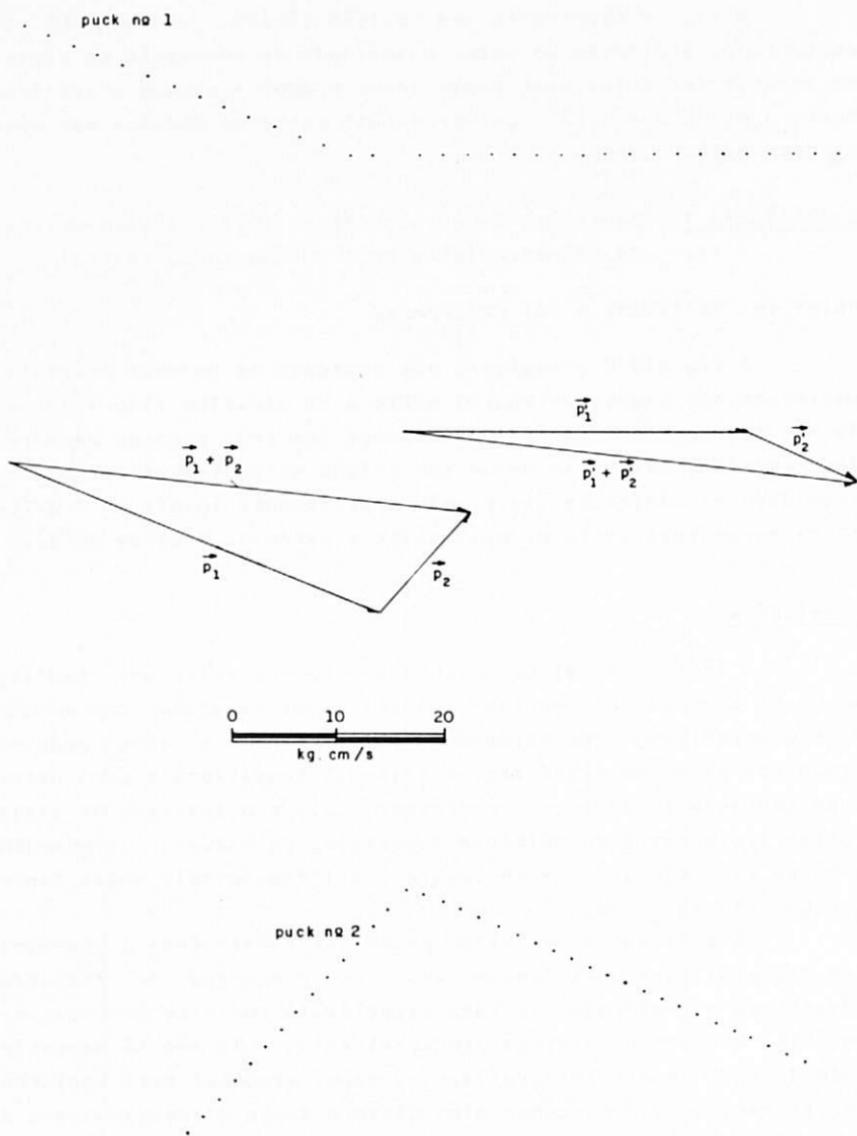


FIG. 9 - Colisão entre dois pucks. Os módulos dos vetores quantidades de movimento do sistema constituído pelos dois pucks são, antes e após a colisão, respectivamente, 87 kg.cm/s e 85 kg.cm/s .

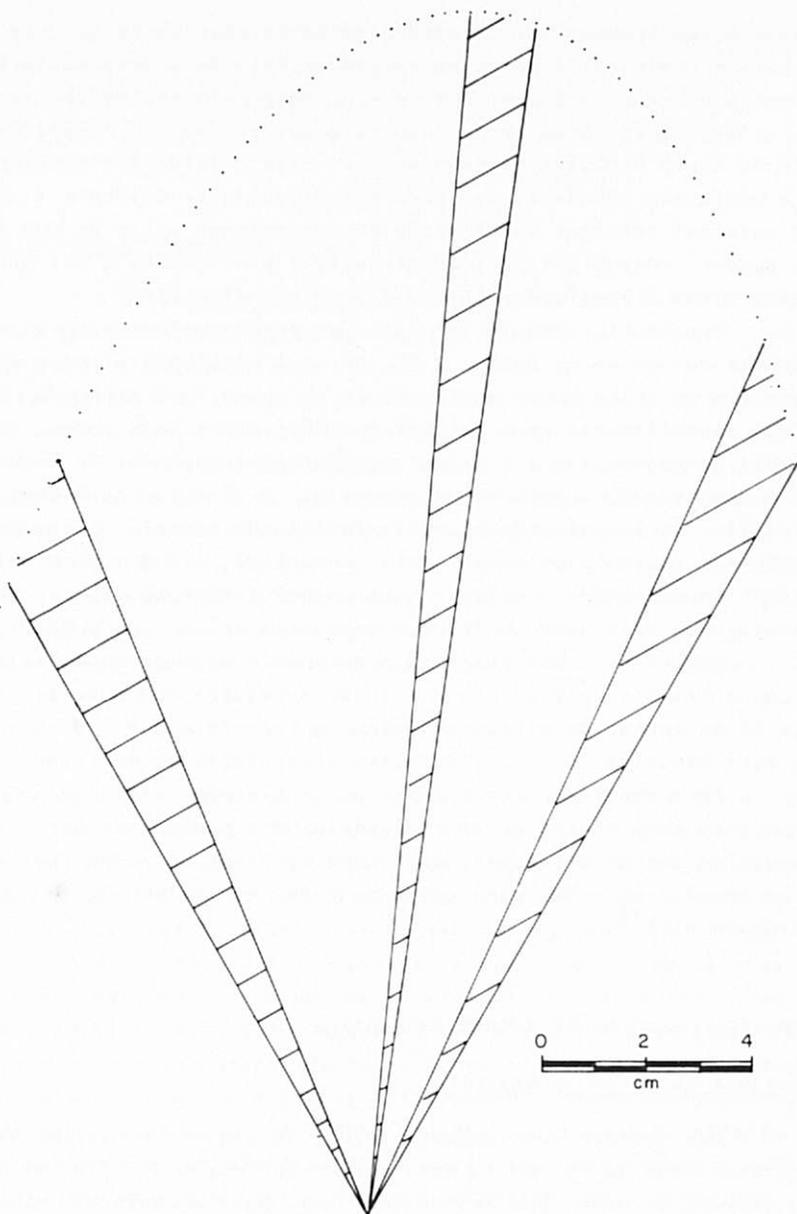


FIG. 10 - Movimento de um puck de 1026 gramas e 12 cm de diâmetro, sujeito a uma força central. As áreas dos triângulos hachurados, varridos pelo raio vetor em intervalos de $1/12$ de segundo, são da esquerda para a direita, respectivamente, 14,1 ; 14,5 e 14,1 cm^2 .

ou com o uso inadequado. Quanto à primeira observamos que, se a justarmos a altura da ponta da caneta em relação à mesa da forma descrita no texto e de tal modo que o toque seja realmente suave, a interferência do atrito não será perceptível em experiências de curta duração. Além disso, se esse cuidado for observado a ponta não afundará, mas para evitar qualquer acidente é sempre possível reforçar sua fixação com um pequeno pingo de cola Su per Bonder. Mesmo que, acidentalmente, a ponta venha a ser danificada ainda é possível recuperá-la com uma lixa fina.

O puck P1, como já foi dito, se presta melhor para experiências com um único puck. O P2, por sua vez, embora possa ser empregado em quase todas as situações em que o P1 é utilizado, foi criado especialmente para estudar colisões entre dois pucks; tem nítidas vantagens sobre o primeiro, tanto nos aspectos de construção e manutenção, quanto no de manuseio. O vínculo representado pelos fios de ligação (leves e flexíveis) que poderia preocupar também não causou problemas. Isto, por sinal, era de esperar pois existem equipamentos similares funcionando satisfatoriamente com vínculos bem mais pesados (fios e mangueira de ar) que o do P2.

Embora tenhamos descrito apenas dois modelos aqui, existe uma outra alternativa que é acionar a pequena bomba de ar do puck P2 às custas de pilhas ao invés de transformador. Esta versão está descrita no cap. 5 de nossa dissertação de mestrado¹⁷.

Para finalizar resta dizer que o sistema eletromecânico idealizado para registrar as trajetórias dos pucks pode ser empregado em outras situações, quer como marcador de tempo quer como um gerador de ondas para cubas de onda, equivalente àqueles descritos no PSSC¹⁸.

APÊNDICE: ESCOLHA DE ALGUNS PARÂMETROS

Relativos ao corpo do aparelho

Uma decisão que tomamos, depois de algumas tentativas, foi a de usar cano de PVC de $1\frac{1}{2}$ pol. para a confecção do corpo do P2 e a outra a de usar cano de PVC de $\frac{3}{4}$ pol. para a confecção do carretel. Em função disso o diâmetro do núcleo e da carcaça do eletroímã ficaram indiretamente fixados.

Outros parâmetros, como espessura da carcaça, comprimento da armadura e do núcleo e espaço entre núcleo e carcaça, cujo di

mensionamento é importante para evitar ao máximo fugas magnéticas ou saturação de ferro (por exemplo), foram escolhidos após uma leitura cuidadosa do cap. I da ref. 19. Para alguns outros aspectos consultamos, entre outros, a ref. 20 (capítulos 3 e 4 e apêndice 1).

Relativos à câmara

A pressão p_0 que se consegue obter na cavidade central do disco depende da força de atração atuando na armadura (ou na membrana de borracha, uma vez que a armadura e membrana estão unidas através da caneta). Quanto menor o diâmetro da membrana menor será a força necessária para se conseguir uma dada pressão. Assim, se quisermos que a bomba trabalhe sem muito esforço (e suavemente) e se pretendermos sustentar grandes massas, devemos escolher câmara com diâmetro tão pequeno quanto possível.

E a altura da câmara? A equação $pV = K$ (constante) que relaciona a pressão (p) e o volume (V) de um gás (ideal) quando a temperatura é mantida constante poderá nos ajudar. A partir dela obtemos, para pequenas variações de pressão, a relação:

$$\Delta p = - \frac{K}{V^2} \Delta V .$$

Esta equação mostra que a variação de pressão é diretamente proporcional à variação do volume inicial e inversamente proporcional ao seu quadrado. Por outro lado, as válvulas de saída deverão se abrir logo no início do curso da membrana, ou seja, a diferença de pressão desejada deve ser conseguida para pequenos deslocamentos da membrana. Destes dois fatos concluímos que as dimensões da câmara deverão ser escolhidas de modo a ter o seu volume inicial tão pequeno quanto possível, o que significa dizer que a altura da câmara, da mesma forma que seu diâmetro, deverá ser antes pequena que grande. Entretanto a escolha desses dois parâmetros terá que ser compatível com um fluxo que permita um funcionamento satisfatório dos pucks. Isto nos obriga a fazer algumas tentativas até encontrar os parâmetros mais apropriados (na realidade foi isso que fizemos, pois a bomba representada na fig. 7 foi escolhida depois de duas tentativas mal sucedidas).

Quanto à bobina

A força de atração atuando na armadura é dada por²¹

$$F = \frac{\mu_0 S (Ni)^2}{2x^2} .$$

onde μ_0 é a permeabilidade do ar, S a área do entreferro e x a sua espessura; N o número de espiras e i a corrente atravessando a bobina. Como no caso de uma meia onda senoidal a relação entre a corrente média, (i_m) lida num amperímetro para corrente contínua de bobina móvel e a corrente de pico (i_p) é dada por $i_m = i_p/\pi$ a força máxima será proporcional a $(Ni_m)^2$, se fixarmos x e S . Em outras palavras: o que importa, efetivamente, do ponto de vista da força, é o produto Ni_m . O valor desse produto necessário para fazer funcionar um dado puck é função da pressão (p_0) necessária para sustentá-lo e pode ser determinado, experimentalmente, como segue. Montamos uma bobina com um número N' arbitrário de espiras e vamos medindo a corrente média à medida que variamos a tensão aplicada na bobina por meio de um VARIAC. Quando o puck começar a flutuar e deslizar satisfatoriamente, anotamos a corrente (i_m') e calculamos o produto $N'i_m'$. Agora, cabe ao construtor escolher a corrente média de trabalho. Por exemplo, alguns transformadores comerciais comuns têm um limite de corrente de 0,5 A. Se quisermos alimentar dois pucks com um único transformador, a corrente em cada um não deverá ultrapassar 0,25 A. Se adotarmos este valor o novo N será dado por $N = N'i_m'/0,25$. O passo seguinte é escolher um fio que suporte a corrente fixada e que tenha um diâmetro de tal ordem que as N espiras possam ser enroladas no carretel já construído. No nosso caso o fio que se mostrou adequado foi o de nº 28. Instalando, a seguir, a bobina com as N espiras no seu lugar, voltamos a aplicar tensões variáveis, com o auxílio de um VARIAC, até que o puck volte a flutuar ou até que a corrente média atinja o valor fixado de 0,25 A. Assim saberemos a tensão nominal de trabalho e poderemos nos decidir pela compra do transformador adequado (se não quisermos empregar um VARIAC).

Esses números são todos aproximados, pois são determinados para um dado entreferro. Se, por exemplo, usarmos pucks mais leves ou mais pesados do que aquele com o qual determinamos os parâmetros, não será necessário mudar a tensão aplicada, pois a pres

são p_0 também pode ser ajustada variando, simplesmente, a espessura do entreferro.

REFERÊNCIAS

- 1) MARCLEY, R.G. - Air suspended pucks for momentum experiments. Am. J. Phys., 28: 670-4, 1960.
- 2) MEINERS, H.F. (ed.) - Physics demonstration experiments. New York, The Ronald Press, 1970. V.1, cap.10, p.221.
Esta obra contém dois capítulos que tratam de dispositivos sustentados por colchão de ar.
- 3) WHITNEY, W.M. - Theory of air-supported puck. Am. J. Phys., 32: 306-12, 1964.
- 4) Ver. ref. 1.
- 5) a) NEHER, H.V. & LEIGHTON, R.B. - Linear air trough. Am. J. Phys., 31: 255-62, 1963.
b) STULL, J.L. - Linear air trough: a modification. Am. J. Phys., 30: 839-40, 1962.
- 6) DAW, H.A. - A two-dimensional air table. Am. J. Phys., 31: 867-9, 1963.
- 7) Ver ref. 3.
- 8) a) DUANE, B.H. - Air suspension gyroscope. Am. J. Phys., 23: 147-50, 1955.
b) MARCLEY, R.G. - Air suspension gyroscope. Am. J. Phys., 28: 150-5, 1960.
- 9) GROSS, W.A. - Gas film lubrication. New York, John Wiley & Sons, 1962. p.3.
- 10) Ver ref. 9, p.3.
- 11) Ver ref. 3, p.309.
- 12) Ver ref. 1, p.673.
- 13) MURAMATSU, M. - Produção, utilização e avaliação de filmes didáticos de física. São Paulo, USP, 1976. p.20-2. (Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências apresentada no IFUSP).
- 14) PSSC (Physical Science Study Committee) - Physics: teacher's resource book and guide. 2 ed. Boston, D.C. Heath and Company, 1967. Parte 3, p.19-6.
- 15) a) Ver ref. 1.
b) GOLDEMBERG, J. - Física Geral e Experimental. 2 ed. São Paulo, Ed. Nacional, 1970. V.1, p.467 e p.473-5.
c) HARVEY, P.M. & WAGNER, R.R. - Transistorized Spark Timer. Am. J. Phys., 36: 60-1, 1968.

- 16) Ver ref. 3, equação 2-4, p.309.
- 17) HESSEL, R. - Discos sustentados por colchão de ar: uma nova proposta. São Carlos, USP, 1981. (Dissertação de Mestrado em Física Aplicada apresentada no IFQ de São Carlos-USP).
- 18) a) PSSC (Physical Science Study Committee) - Física. 3ed. São Paulo, EDART, 1968. Parte 1, p.217-9.
b) PSSC (Physical Science Study Committee) - Física. Ed.prel. Rio de Janeiro, Centro de Publicações Técnicas da Aliança, 1964. Parte 2, p.384-92.
- 19) JUNG, A. - Calcul des Électro-Aimants Industriels. 2 ed. Paris, Dunod, 1958.
- 20) SKILLING, H.H. - Electromechanics. New York, John Wiley & Sons, 1962.
- 21) Ver ref. 20, p.66.

Maiores informações escrever para: ROBERTO HESSEL
Departamento de Física
IGCE - Unesp
Cx. Postal 178
13500 Rio Claro SP