

Instrumentação para Ensino

Convecção em Fluidos

André Luís Delvas Fróes



Orientador: Prof. Dr. Alberto Saa
IMECC – UNICAMP

Coordenador: Prof. José J. Lunazzi
IFGW – UNICAMP

1 Motivação

A convecção é um assunto pouco tratado pelos educadores. A grande maioria dos alunos dos ensinos fundamental e médio terminam seus cursos sabendo apenas que ar quente sobe, ar frio desce. Isto é compreensível, pois qualquer educador de física competente conhece as grandes dificuldades que envolvem a modelagem da dinâmica de fluidos, e certamente estes alunos não teriam base para tal. Mas deveríamos deixar de explicá-los um fenômeno que permeia seu dia a dia, como este?

Afinal, Ao aquecermos líquidos em um fogão, notamos rapidamente a formação de correntes de convecção, em especial em líquidos mais espessos e cheios de componentes leves e livres para se movimentar, como por exemplo sopas. Vemos estes componentes emergindo em um ponto, se movendo na superfície e novamente submergindo (Pois o líquido perde calor em seu contato com o ar).

O voo de pássaros, prescindindo do bater de asas, também é um exemplo. É muito comum a visão de aves planando em círculos. Elas se aproveitam de correntes ascendentes de ar, aquecido na superfície em dias ensolarados.

Os Balões se movem pelo mesmo princípio, tendo o ar em seu interior aquecido por inflamadores. Os pequenos balões, comuns em festas juninas, tem o ar em seu interior aquecido pelo fogo de uma pequena chama.

Como poderíamos, então, ensinar a convecção para estes jovens? Podemos utilizar experimentos didáticos. A visualização do fenômeno, em sala de aula, pode ao mesmo tempo ensinar e divertir, sem o envolvimento de um formalismo teórico. Com a difusão destes experimentos, alguns deles podendo ser realizados com materiais simples e baratos, muito estaria sendo feito para a melhoria do ensino no país.

Existem, também, motivações acadêmicas para o estudo da convecção.

Nas regiões mais centrais da terra, a temperatura pode chegar a $5000C$. Esta temperatura é devida a resquícios de energia da formação da terra, e pelo decaimento radioativo de isótopos instáveis no interior da terra (Em geral, urânio, tório e rubídio) ao longo do tempo. Alguns dos materiais que formam a terra possuem baixa condutividade térmica, de modo que esta energia se conserva e o núcleo da Terra continua quente, apesar da idade da mesma (Aproximadamente 4,5 bilhões de anos).

Modelos atuais afirmam que nas regiões mais exteriores da Terra, abaixo das placas tectônicas, temos um líquido extremamente viscoso, o magma, composto em geral por ferro líquido. Têm-se significativas evidências da existência de correntes de convecção neste líquido, que seriam responsáveis

tanto pela movimentação das placas tectônicas quanto pelo campo magnético da terra (Por arrastar consigo íons carregados).

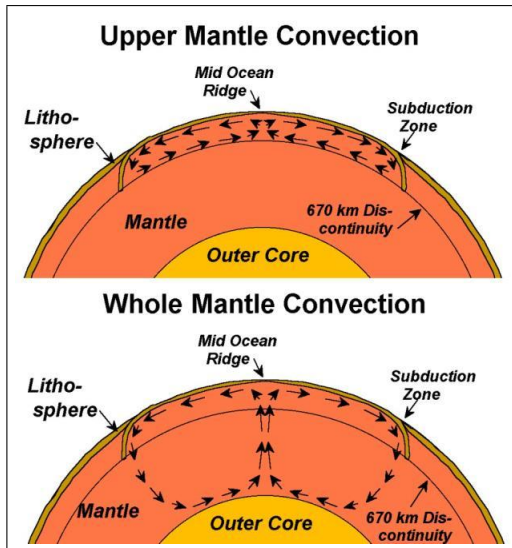


Figura 1: Esboço demonstrando a convecção no magma terrestre [3]

Entrando no terreno da astrofísica, temos também modelos para a estrutura interna de estrelas, baseados na convecção dos gases no interior das mesmas. Tomemos como exemplo o Sol. A energia térmica gerada pelas reações nucleares no centro dele é transportada, em parte, por meio de convecção para as suas regiões mais externas. Nestas regiões, formam-se células de convecção similares às que estudaremos neste experimento, apesar de sua imensidão em tamanho. Células gigantes (Aproximadamente do tamanho de Júpiter) já foram observadas no Sol, há poucos anos.

O primeiro a dedicar-se seriamente ao estudo da convecção foi Bérnard (Nas consultas na internet pode ser necessário procurar por Bernard ou Barnard) por volta de 1900. Para este propósito, ele aqueceu camadas finas de um líquido viscoso, e verificou a formação de células de convecção regulares e hexagonais, ao aumentar a temperatura.

Os vulcões e terremotos representam as formas mais enérgicas e rápidas de manifestação desta dinâmica do planeta. Ocorrem tanto em áreas oceânicas como continentais, e são válvulas de escape que permitem o extravasamento repentino de energias acumuladas ao longo de anos, milhares ou milhões de anos. Esses eventos são sinais de que, no interior da Terra, longe dos nossos olhos e instrumentos de pesquisa, ocorre a convecção. Ela arrasta, por atrito, as placas tectônicas, que movem-se em mútua aproximação ou distanciamento, a velocidades medidas de alguns centímetros por ano, assim contribuindo para a incessante evolução do relevo e da distribuição dos continentes e oceanos na superfície terrestre.

2 Objetivos

Buscamos:

1 - Projetar e realizar experimentos simples, com materiais de fácil obtenção, para demonstrar as propriedades da convecção em fluidos.

2 - Realizar vídeos demonstrativos dos mesmos.

3 - Explicar os fenômenos em dois níveis: Para alunos dos ensinos fundamental, descrevemos fenômenos interessantes da natureza envolvendo a convecção (Correspondendo a seção Motivação). Para os alunos do ensino médio, uma explicação verbal do fenômeno (Conceitos introdutórios, na teoria, além da motivação), baseado em fenômenos interessantes da natureza que ocorrem devido à convecção. Para alunos de graduação e educadores, descrevemos o fenômeno de forma mais aprofundada no restante da teoria, mas tentando manter uma linguagem sucinta e, na medida do possível, agradável.

3 Teoria

3.1 Dinâmica de Fluidos

3.1.1 Conceitos introdutórios

Suponhamos uma camada de líquido contida em um recipiente, sendo aquecida por baixo. O líquido no fundo do recipiente se expandirá termicamente, o que resultará em uma diferença de densidade entre o líquido do fundo e do topo. Haverá, portanto, uma tendência ao movimento. Pequenas flutuações na superfície do líquido permitirão que o movimento se estabeleça, mas ele será barrado pela viscosidade do líquido até que um maior gradiente de temperatura se estabeleça e vença este estado de inércia. A partir deste momento, dizemos que o líquido está num estado de convecção térmica.

Todos os fenômenos que estudamos neste projeto são baseados na equação de Navier-Stokes. Ela descreve o movimento de fluidos incompressíveis, e é obtida através das equações de conservação de massa e da relação de forças em ação no sistema. Por exemplo, teríamos que adicionar a esta equação um termo para descrever a influência da força gravitacional, pois em todos os nossos experimentos ela exerceu uma influência importante.

Em nossos experimentos, sempre aquecemos nossos recipientes por baixo. Temos, portanto, a situação descrita pela figura ao lado. Neste caso, o aquecimento é uniforme em todos os pontos do recipiente com simetria retangular. Temos a formação de diversas células de convecção simétricas. Caso o aquecimento não seja uniforme, poderemos obter a formação de células nas mais diversas simetrias.

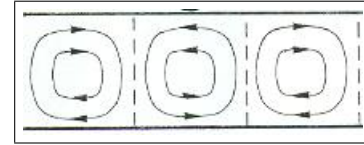


Figura 2: Corte bidimensional em células de convecção [1]

No caso do aquecimento uniforme, a forma tridimensional usualmente obtida para as células é hexagonal, como mostra a figura ao lado. A figura acima seria, portanto, um corte da célula em questão.

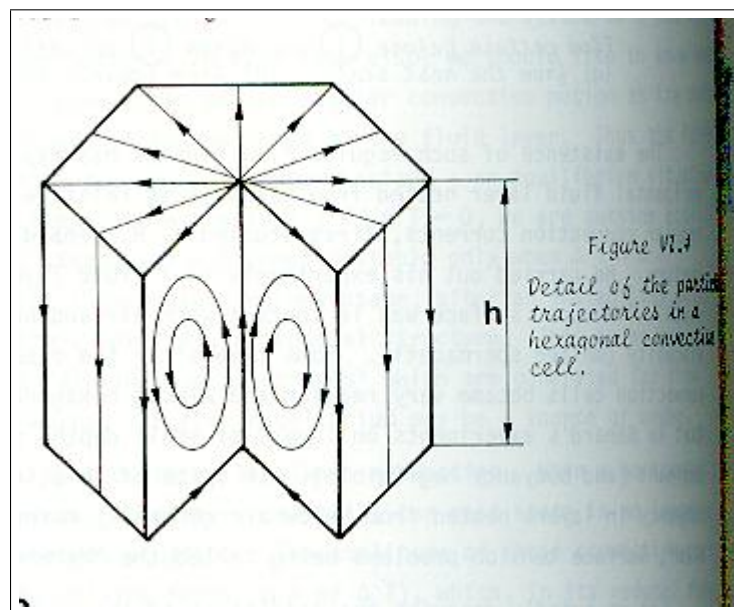


Figura 3: Célula de convecção hexagonal, geometria típica das células de Bénard [1]

3.1.2 A equação de Continuidade

Todos os fenômenos que estudamos neste projeto são baseados na equação de Navier-Stokes. Ela descreve o movimento de fluidos incompressíveis, e é obtida através das equações de conservação. Para nosso experimento, precisaremos levar em conta também a força gravitacional, e adicionar um termo para descrevê-la.

A equação de conservação de massa, também chamada de equação da continuidade, é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \vec{v}) \quad (1)$$

Ela nos diz que qualquer variação de massa em um elemento infinitesimal de volume ocorrerá porque a mesma penetrou ou deixou o volume, devido a sua velocidade. Ela também é chamada equação da conservação de massa, pois afirma que a massa do sistema jamais desaparece.

Obviamente, esta é uma equação muito geral, e pode ser escrita de uma forma integral para grandes volumes. Nesse caso, ela assumiria a forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dv = \Phi = - \int_{\Sigma} (\vec{j} \cdot \vec{n}) d\Sigma \quad (2)$$

Onde Φ é o fluxo total de massa, \vec{j} é a densidade de fluxo de massa e Σ é superfície do volume tratado.

No caso de um fluido incompressível ($\rho = cte$), temos a equação 1 reduzindo-se a:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3)$$

3.1.3 Equação de Navier-Stokes

Outro importante fator a ser levado em conta é a variação da pressão em cada ponto do sistema.

Se tomarmos um pequeno cubo de água, a força sobre cada face do mesmo será dada por $f = pA$ onde A é a área da face e p a pressão sobre a face. A figura ao lado nos mostra o comportamento sobre o eixo x , teremos a força resultante:

$$f_{resx} = p_x \Delta y \Delta z - \left(p_x + \frac{\partial p_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z = -\frac{\partial p_x}{\partial x} \Delta V \quad (4)$$

Para todas as direções, teremos:

$$f_{res} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{p} \quad (5)$$

Onde f_{res} é a força por unidade de volume. Como estamos lidando com um líquido viscoso, e nossa amostra está submetida à força da gravidade, teremos como força total em cada ponto do sistema:

$$F_{tot} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{p} + \rho \vec{\nabla} \Phi + f_{visc} \quad (6)$$

Onde Φ é o potencial gravitacional no ponto estudado.

Sabemos que $\vec{F} = \rho \vec{a}$ Onde \vec{a} é a variação da aceleração com o tempo. Ainda que suponhamos conhecer a velocidade do fluido em todos os instantes de tempo, devemos tomar cuidado ao tratar esta aceleração. Ela não é uma simples derivada temporal da velocidade no tempo. A derivada simples da velocidade no tempo nos dá a variação da velocidade em um ponto FIXO do espaço. Mas nosso pequeno cubo de líquido está se movendo com o tempo. Portanto, teremos \vec{a} :

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + v_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} \quad (7)$$

Teremos, com 6 e 7, a equação de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{p}}{\rho} + \vec{\nabla} \Phi + \frac{f_{visc}}{\rho} \quad (8)$$

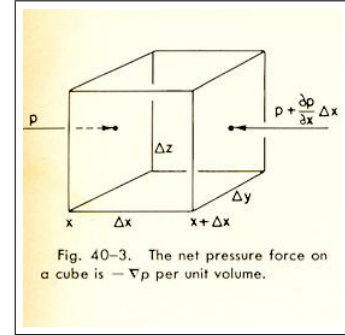


Figura 4: Pressão sobre um cubo de líquido [2]

3.2 Comentários Teóricos Finais

Utilizaremos a equação de Navier-Stokes, deduzida acima, para descrever o problema. Isto pode soar inconsistente, pois acabamos de afirmar que a densidade do líquido se altera devido ao aquecimento. mas devemos lembrar que esta variação é muito pequena, se comparada com as escalas do problema.

A obtenção de uma solução analítica para esta equação é, em geral, impossível. As aproximações lineares nos fornecem soluções adequadas para baixas temperaturas. A obtenção destas aproximações fogem, e muito, de nossos objetivos no presente trabalho. Acrescentaremos apenas que estas soluções dependem de um parâmetro, conhecido como número de Rayleigh.

$$Ra = \frac{g\alpha\beta d^4}{\kappa\nu} \quad (9)$$

Onde g é o campo gravitacional nas proximidades da terra, α é a constante de expansividade térmica, d é a espessura do líquido, κ é a difusividade térmica, ν é a viscosidade cinética e β é o gradiente da temperatura. No momento em que esta constante atinge um certo valor crítico, o líquido passará a se movimentar e as correntes de convecção se formarão.

4 Montagem experimental

4.1 Experimentos didáticos

Uma parte importante de nosso trabalho consistiu na criação de experimentos didáticos, que pudessem ser realizados com materiais caseiros e de fácil obtenção. Montamos dois deles, para servir de exemplo, e realizamos vídeos para mostrar seu funcionamento.

4.1.1 Experimento 1

O primeiro experimento é o mais conhecido dos experimentos de convecção de fluidos.

Materiais:

- Uma travessa de vidro.
- Duas velas.
- 2 canecas, ou qualquer outro objeto que sirva de suporte.
- Partículas marcadoras.
- Líquido viscoso.



Figura 5: Materiais para o ex 1

Consiste em um recipiente, em geral uma travessa de vidro, na qual um líquido viscoso é inserido. São adicionadas partículas marcadoras, a travessa é colocada sobre um suporte e aquecida, em geral, por velas. logo surgem as correntes de convecção, que podem ser visualizadas devido ao movimento das partículas marcadoras.

A escolha das partículas marcadoras é importante. Caso a escolha seja óleo, devemos evitar ao máximo qualquer corante líquido ou partícula úmida, pois caso a temperatura aumente muito, certamente haverá problemas. Para o vídeo, concluímos que componentes de cozinha secos como canela são adequados, pois filmamos de cima para baixo. Para a visualização em outros ângulos, podemos usar outros componentes, como por exemplo pequenas folhas secas, que geram um efeito interessante, como podemos ver em [3].

O número de células de convecção dependerá da simetria do aquecimento. se aquecermos um lado da travessa, o líquido aquecido subirá e se movimentará na direção oposta ao gradiente de temperatura, na direção do outro lado da travessa. Caso a travessa seja aquecida pelo centro, teremos duas células de convecção distintas, uma vez que agora teremos os dois lados da travessa frios e o centro aquecido. Outras formações podem ser obtidas, e as correntes de convecção continuarão até que a temperatura do líquido se homogenize.

Vantagens: Utiliza materiais extremamente fáceis de se obter.

Desvantagens: Gasto excessivo de óleo. Consome muito tempo para a realização de um novo experimento, pela questão da troca e/ou resfriamento do óleo.

Dentre os vídeos realizados, escolhemos 1. Segue um quadro do mesmo:



Figura 6: Experimento 1

4.1.2 Experimento 2

Idealizamos e montamos este experimento, pois ele também é muito simples e muito mais agradável de ser realizado do que o experimento 1, além de mostrar efeitos mais interessantes.

Materiais:

- Um ferro de passar roupas.
- Um grampo de marcenaria (Sargento).
- Algumas arruelas, ou pequenos objetos de metal.
- placas de petri, ou qualquer recipiente de vidro de pequeno porte.
- Partículas marcadoras.
- Líquido viscoso.



Figura 7: Materiais para o ex 2

Fixando firmemente o ferro de passar roupas com o grampo, podemos dispor as arruelas da forma como desejarmos obter as células de convecção. No caso, utilizamos um ferro de tensão recomendada 220v em tensão 110V. Dessa forma, temos a potência do ferro reduzida em aproximadamente 4x, e obtemos uma temperatura amena.

Uma única arruela no centro da placa de petri resultará em uma grande célula de convecção, com o óleo se deslocando da arruela até a extremidade da placa, e uma pequena no centro, devido ao pequeno furo da mesma. Em um dos vídeos, essa pequena célula de convecção fica evidente, pois parte do material fica um bom tempo parada no centro da placa de petri. Este problema possui uma inequívoca simetria cilíndrica.

Com duas arruelas, em cantos opostos, vemos o material se aglomerando no centro da placa. o eixo de simetria é a reta formada pelos pontos equidistantes aos centros das duas arruelas.

Com três arruelas, temos a formação de um "Y" com o material empurrado pela corrente de convecção. Neste caso, temos um efeito interessante.

Alterando a posição e adicionando mais arruelas, podemos facilmente obter outras simetrias na convecção.

Vantagens: Fácil de ser manuseado. Pequeno gasto de materiais. Podemos realizar vários testes seguidos, e a limpeza das placas é rápida. Efeito mais interessante e imediato do que o do experimento 1.

Desvantagens: O grampo e as placas de petri podem ser mais difíceis de obter por parte de educadores, uma vez que provavelmente não possuem em casa. Mas certamente são materiais acessíveis, e não inviabilizam a realização. Um suporte artesanal e frascos de vidro podem ser alternativas.

Dentre os vídeos realizados, escolhemos 3, nas geometrias descritas acima. Seguem fotos de dois deles:



Figura 8: Experimento 2

4.2 Experimento Células de Bérnard

A obtenção das células de Bérnard exige um aquecimento razoavelmente homogêneo do fundo do recipiente, e requer vários testes para descobrir a temperatura adequada para a obtenção das mesmas. Inicialmente, formam-se células aleatórias e de tamanhos desproporcionais. Após um certo ponto de instabilidade, formam-se células regulares, de tamanho similar e geometria aproximadamente hexagonal.

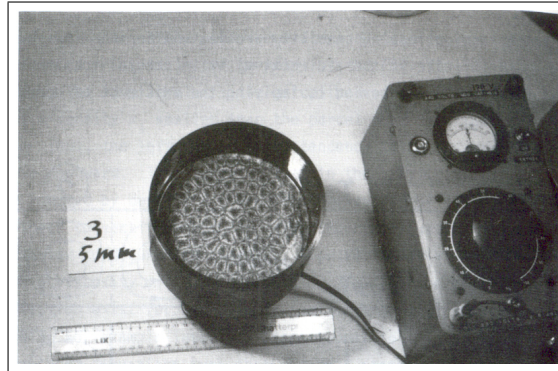


Figura 9: Células de Bérnard [1]

De início, acreditávamos que a obtenção de um aquecedor adequado seria nosso maior problema neste projeto. Logo nos dissuadimos disso, pois até mesmo com o aparato do experimento 2 nós conseguimos obtê-las. De fato, tivemos graves problemas para visualizar as mesmas. Testamos diversos tipos de partículas marcadoras, mas nenhuma se mostrou adequada. Não conseguimos nenhum vídeo realmente bom que mostrasse a formação das mesmas. A formação das células só é visível com a inserção de partículas, mas, em contrapartida, se inserirmos as partículas antes do tempo, elas atrapalham a formação das células. Se demorarmos demais para colocar as partículas, a temperatura do líquido já se homogeneizou e perdemos sua formação.

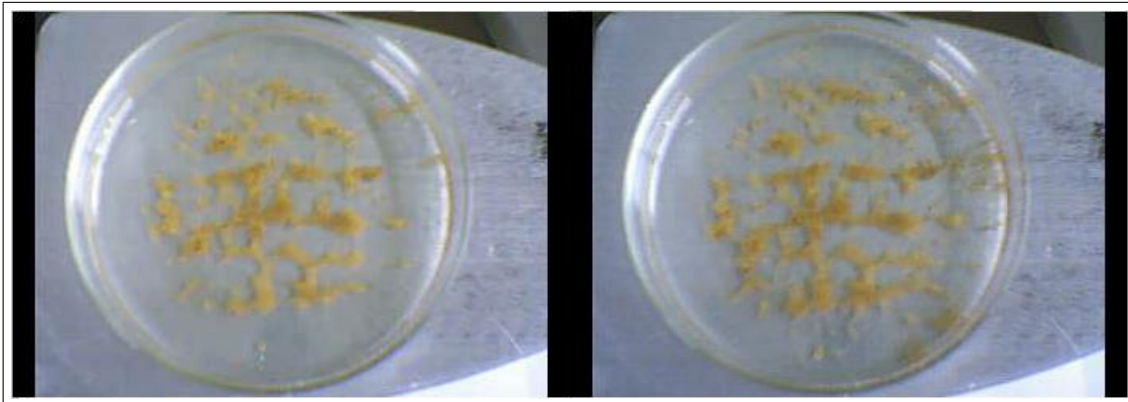


Figura 10: Células de Bérnard

Vemos acima as fotos tiradas de um dos vídeos que realizamos, em um dia que fazíamos testes do experimento dois, e aproveitamos sua montagem experimental para tentar obter as células de bérnard.

Neste momento, tomamos o cuidado de aguardar que a temperatura do ferro se homogeneizasse a uma baixa temperatura. Colocamos a placa com uma camada fina de óleo sobre ele. Aguardamos alguns momentos e começamos a jogar a canela, que dispunhamos no momento. Pudemos verificar uma formação aparentemente hexagonal.. tentamos jogar mais marcadores, mas o excesso de partículas começou a atrapalhar a visualização. Em pouco tempo, o a temperatura do óleo se homogeniza e a formação hexagonal desaparece. Este vídeo, por ser o melhor que conseguimos, foi escolhido para ser entregue.

Os outros vídeos eram arquivos enormes e ainda menos ilustrativos, e foram descartados. Em muitos deles sequer pudemos visualizar as células e saber se elas haviam se formado.

5 Conclusão

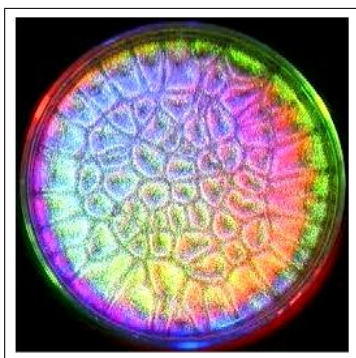


Figura 11: Células de Bérnard [5]

Em pesquisas na internet, não conseguimos encontrar nenhuma foto ou vídeo na qual as células de bérnard fossem obtidas com sistemas de aquecimento e marcação tão simples como o do livro [1], cuja figura mostramos acima. Quando escolhemos este projeto, talvez tenhamos subestimado as complicações do problema. Como vemos na figura ao lado, em geral usam-se complicados de marcação. No caso, usa-se um sistema de iluminação, partículas marcadoras, corantes e fotografias de longa exposição. Estamos muito felizes por ter obtido experimentalmente estas células com um aparato caseiro e extremamente simples.

Acreditamos que, pela questão dos experimentos didáticos, conseguimos fazer um trabalho interessante, provando que com gastos mínimos e um pouco de criatividade podemos fazer o ensino de física se tornar mais interessante. A física deve deixar de ser encarada como apenas mera boa memória para fórmulas e habilidade numérica. O mais importante é justamente a compreensão da física envolvida no fenômeno em jogo.

6 Comentários do Coordenador

Comentário ao Projeto:

Projeto aprovado, bom trabalho!

Comentário ao Relatório Parcial:

Relatório aprovado, nota 7,0 . O trabalho experimental parece aquém do desejável, pois não parece tão difícil conseguir um marcador para se ver a convecção nem fazer um aquecedor elétrico.

7 Trechos Importantes de Páginas da Internet

7.1 Referência [3]

<http://web.ics.purdue.edu/braille/edumod/convect/convect.htm>

Objectives: Experiment with thermal convection. Illustrate how thermal energy (heat) can generate motion (flow) in a fluid. The thermal convection in this model is similar to the convection that is inferred for the Earth's mantle. Convection can produce horizontal flow that can cause (or is related to) plate motions. Investigate the viscosity of a fluid and illustrate that the Earth's mantle can be thought of as a solid for short duration processes (such as the propagation of seismic waves), and as a very viscous fluid for long duration processes (such as mantle convection and plate tectonic movements).

Materials:

1 Glass bread loaf dish (1.5 liter; a 2 liter, 20x20 cm or 8x8 inch glass dish can be substituted if two Sterno cans or 3 small candles are used because of the extra width of the container). 2 Ceramic coffee cups. 1 small can Sterno or 2 small candles. vegetable oil (about 800-1000 ml). 10 ml ($\tilde{2}$ teaspoons) thyme. spoon. matches. metric ruler. stopwatch. funnel (to pour oil back into container). 3 pieces of thin (about 2mm, or 1/16" thick) balsa wood, each 4x10 cm.

For viscosity experiment: Karo light corn syrup (about 60 ml). Cookie sheet. Aluminum foil. 3 small containers, such as 1/8 cup measuring cups. Silly Putty. 1 Teflon coated pan or cookie sheet.

Thermal Convection Experiments: Mix the vegetable oil and the thyme (spice) in the loaf dish. Stir thoroughly to distribute the flakes of thyme. Arrange loaf dish and other materials as shown in Figure 1. (Because of the viscosity of the oil and the density of the flakes of thyme, the pieces of thyme are approximately neutrally buoyant. If left unstirred for a long period of time, the thyme will not be evenly distributed in the volume of oil, some of the thyme will tend to float and some tend to sink. However, the thyme stays distributed for a sufficient length of time to perform the experiment. If the thyme becomes significantly separated, just stir to mix thoroughly, let the mixture stand without heat until the flakes of thyme are not moving, and begin the experiment again by adding heat.)

1. - Observe the oil and spice mixture. With no heat (energy) being added to the system, these should be little or no movement of the liquid. The flakes of thyme will flow with the liquid, showing the direction and velocity of any fluid flow.

2 - Light the Sterno can and let the liquid heat up for a couple of minutes. (If you do not wish to use the Sterno as a source of heat, you can use two small candles (Figure 2) or a coffee cup with a one-cup electric element heater to heat water in the cup and provide heat to the bottom of the loaf dish.) As the oil heats and begins to flow, observe the pattern of fluid flow (circulation) by noting the location of individual flakes of thyme over time (Figure 3). Be sure to view the model several times during the experiment, both from above the dish and from the side of the dish. Draw a sketch of the circulation (copies of Figure 4 can be used as a base diagram for sketching the flow using arrows). Is the pattern approximately symmetric on the two sides of the heated area? Where do you observe upward flow? Where do you see downward flow? Where do you observe horizontal flow?

Note that the flow defines a convection cell (actually two cells) in which upward flow above the flame (caused by heating of the fluid which causes expansion and a reduction in density) causes horizontal flow near the surface of the liquid. Cooling of the liquid near the ends of the container increases the density of the liquid and produces sinking and a return horizontal flow toward the center of the container, thus completing a "cycle" of fluid flow in the convection cell. Note that the heat added to the bottom of the container is carried to the surface and distributed primarily by movement of the heated liquid (convection current) rather than by conduction. This type of energy movement is called thermal convection because added heat causes the fluid flow (circulation by convection) by lowering the density of the liquid. The difference in temperature between the near surface region of the oil measured above the heat source and near the ends of the loaf dish (far from the heat) will be about 2-3°C and can be observed using a sensitive thermometer. (It is not necessary to heat the oil for a long time, or to a high temperature, to cause convection. The convection will begin shortly after the heat is applied to the bottom of the loaf dish. The heating time will be somewhat longer using the candles.)

3 - Measure the horizontal velocity of the convective flow near the surface of the liquid by placing a metric ruler on the top of the container (oriented along the long direction of the loaf dish). By looking down on the convecting fluid and observing an individual flake of thyme, measure the distance that one flake moves in a period of time such as 10 or 20 seconds or more. (One can also perform this measurement by viewing from the side of the dish.) Divide the distance (in cm) by the time to determine the velocity in cm/s (usually slower than about 1 cm/s). Measure the velocity and direction of movement at several locations for the near-surface flow of the liquid. Are all of the measurements approximately the same? Where are the velocities the largest? Where are they the smallest? What could explain these variations in velocity? Are the directions of flow "away from" the heated central area of the container? What effects or characteristics of the model might cause variability in the velocities?

4 - Place the thin pieces of balsa wood on the surface of the liquid as shown in Figure 5. Observe the motion of the pieces of wood (representing the relatively rigid parts of plates such as most continental regions) over time. You should see plate separation or divergence (analogous to continental rifting and subsequent sea floor spreading of the oceanic lithosphere along mid-ocean ridges) at the center of the container where significant upward fluid flow is caused by the heating. (Because of surface tension, the two pieces of wood at the center of the loaf dish may tend to "stick together". In this case, use a pencil or other tool to slightly separate the wood. Once the surface tension is reduced, the plates will move with the underlying fluid flow.) Additionally, as time progresses, two of the plates should collide analogous to the continental collision that often accompanies subduction where two plates are moving towards each other (converging). Using a metric ruler as in step 3, measure the velocity of one of the pieces of wood. How does this velocity compare to the fluid flow velocities that were obtained previously?

Convection in the Earth: Thermal convection is inferred to exist on a large scale in at least two regions in the Earth. The liquid outer core and the upper mantle that behaves as a solid for seismic wave propagation and as a very viscous fluid for long duration geologic processes including convection. The heat that causes convection within the Earth comes from two sources, original heat from accretion and heat released during radioactive decay of unstable isotopes. Although the Earth is about 4.5 billion years old, some heat remains from the accretionary process during its formation because fragments of Earth materials were heated to very high temperatures by impact during formation of the planet, and Earth materials have relatively low thermal conductivity so that significant heat has been retained from the early stages of Earth history. A more important source of heat, however, is the natural, spontaneous, radioactive decay of unstable isotopes of elements that are distributed throughout the Earth, particularly in the crust and mantle. These radioactive elements include Uranium, Thorium and Rubidium. These sources of heat cause the Earth's temperature to increase with depth to a temperature of about 5000C in the inner core.

The Earth's outer core is inferred to be mostly liquid iron. Convective flow within the outer core not only brings heat to the core-mantle boundary where some of it is transferred into the mantle, but also causes the Earth's magnetic field by motions of the electrically conductive inner core material. Temperatures are hot enough in the upper mantle 1200C to cause thermal convection of the highly viscous upper mantle rocks, although the flow velocity is apparently very low - on the order of cm/yr. Mantle convection in either the upper mantle or the whole mantle has been suggested (Figure 6). The mantle flow is a likely cause of plate tectonic motions. There is still considerable debate about the details of convection in the mantle and the relationship of convection to plate tectonics. For example, there is evidence from the identification of subducted slabs in the Earth's upper mantle, that lithospheric slabs (subducted plates) sometimes extend (penetrate) to depths greater than the upper mantle (below the mantle transition zone, including the 670 km discontinuity, where seismic wave velocity increases rapidly with depth indicating changes in composition or crystalline structure or "packing" of mantle minerals). Therefore, mantle convection may not be as simple as the upper mantle convection or whole mantle convection models that are illustrated in Figure 6. Similarly, the exact relationship of mantle convection to plate motions is not presently known. Mantle convection could be the primary cause of plate tectonics. Alternatively, mantle convection could be a more passive response to plate motions. In either case, it appears clear that heat within the Earth is the ultimate driving force for plate tectonics and mantle convection. For more information on plate tectonics and mantle convection, see almost any recent, introductory, college-level textbook on geology, such as Press and Siever (1994), Lutgens and Tarbuck (1999), or Skinner and Porter (1999).

7.2 Referência [5]

http://www.physiology.rwth-aachen.de/user/jaeger/diplom/index_e.html

Marangoni-Bénard-Convection-Cells

If you fill a bowl shallow with a liquid and heat it from below, you get Marangoni-Bénard-convection-cells. We are confronted with this current phenomenon everyday. But normally we don't notice it, because they only get visible when you add mark-particles. This next picture shows silicon oil with graphite. The Video Video shows the building up of the experiment with 3 lamps and a stove. Here it is shown, how the Bénard-cells organizes themselves in 1 minute after stirring, and respectively the same illuminated with colorful light (or the same colorful Video, in a bigger scale, but with 3 MB).

In order to follow the trajectories of the mark-particles, I take a long exposure photo. The added aluminum dust is ground and the contrast is increased by coloring the oil red. The video for that purpose shows 6 seconds (or the same Video, in a bigger scale with 3 seconds). You can download the next image with a high resolution here (but its 4 MB big).

Referências

- [1] Platten, J. K. ; Legros, J. C. , Convection in Liquids, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1984.
- [2] Feynman, R. P., Feynman Lectures on Physics, V.2, e.6, Addison-Wesley, 1977.
- [3] <http://web.ics.purdue.edu/braile/edumod/convect/convect.htm>
- [4] http://www.igc.usp.br/geologia/a_terra.php
- [5] http://www.physiology.rwth-aachen.de/user/jaeger/diplom/index_e.html