

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP

INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN” - IFGW

Disciplina F609 – Tópicos do ensino de Física I

## Simulador do fenômeno de areia movediça

### RELATÓRIO PARCIAL



Yuri Alexandre Meyer  
RA 083113

yuri\_meyer x yahoo.com.br

Orientador: Prof. Dr. Kleber Roberto Pirota  
<http://portal.ifi.unicamp.br/en/pessoas/corpo-docente/295-1477>

Co-orientador: Prof. Dr. Persio Leister de Almeida Barros  
[http://www.fec.unicamp.br/itf/index\\_1.php?pg=251.php&secaoGeral=19&dpto=5](http://www.fec.unicamp.br/itf/index_1.php?pg=251.php&secaoGeral=19&dpto=5)

Coordenador da Disciplina: Prof. Dr. José Joaquin Lunazzi  
<http://portal.ifi.unicamp.br/en/pessoas/corpo-docente/128-professores/274-141>

Campinas – SP  
Outubro de 2013

## 1. Projeto

O projeto em questão está relacionado à construção de um simulador do fenômeno de areia movediça que possibilite o ensino da Física nos níveis fundamental, médio, técnico e superior, cujos conteúdos são descritos abaixo:

- Princípio Fundamental da Dinâmica: força peso e atrito.
- Hidrodinâmica: equação de Bernoulli.

Trata-se, portanto, de um instrumento que possibilite o ensino prático destes temas. Consultando dois professores de Física do ensino médio e um professor de ensino técnico, a ideia deste simulador foi recebida com otimismo, tendo em vista que, no ensino médio, "os alunos apresentam pouco interesse nestes temas" – segundo os professores do Ensino Médio; já no ensino técnico, "é importante mostrar a prática, além da teoria" – segundo o professor do curso técnico em construção civil.

### **Tanque com sistema de reabastecimento**

Esta montagem permite a reutilização da água. No entanto, trata-se de uma montagem com custo maior, tendo em vista que há necessidade da utilização de uma bomba de aquário, cuja potência depende da altura de instalação do tanque de realimentação (reabastecimento). Em média estas bombas custam 70 reais. Além da bomba de aquário, exige-se a instalação de um registro (os mais baratos custam cerca de 20 reais). Segue imagem:

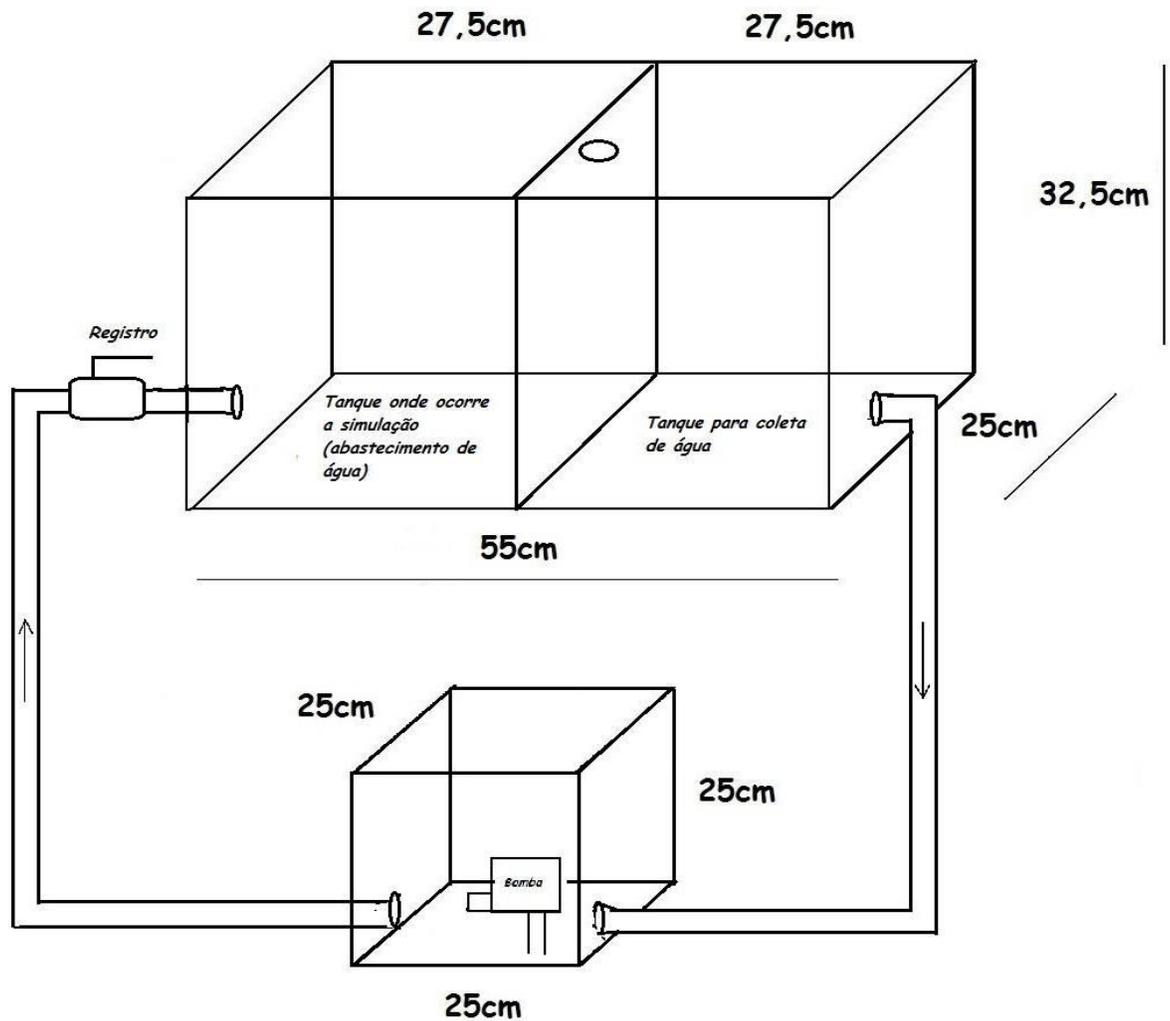


Figura 1 – desenho esquemático do projeto inicial.

### Lista de Materiais

- Tanque principal (aquário); tanque secundário para a reutilização da água.
- Areia de construção (não muito fina).
- Britas (pedregulhos).
- Mangueiras de meia polegada.
- Registro de meia polegada.
- 4 flanges.
- Bomba de aquário submersa.

O projeto original foi desenvolvido na Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, na década de 80. Para o desenvolvimento deste trabalho, conto com a orientação dos professores doutores Kleber Roberto Pirota (IFGW) e Pêrsio Leister de Almeida Barros (FEC).

## **2. Resultados atingidos**

Primeiramente é importante que eu descreva as atividades (diário de bordo do Ensino Aberto) realizadas durante o semestre:

### **Julho de 2013**

04/07 - Empréstimo do livro "Engenharia Geotécnica" na biblioteca da Faculdade de Tecnologia da Unicamp (Limeira) e busca por apostilas com o tema na internet. Início do estudo teórico.

9/07 - Primeira reunião com o Professor Lunazzi para apresentação do projeto.

10/07 - Conversa na Faculdade de Engenharia Civil. Início da busca por um co-orientador.

Primeiras medições do tanque e materiais necessários para elaboração do experimento.

11/07 - Cotação dos materiais (em Limeira).

13/07 - Melhorando o projeto: pesquisando e pensando num sistema de realimentação.

15/07 - Primeiro email ao professor Mauro.

16/07 - Estudo da teoria.

19/07 - Estudo da teoria (2).

25/07 - Professor Kléber Pirota aceita o convite para me orientar.

31/07 - Professor Lunazzi avisa via e-mail que o professor Kleber ainda não lhe enviou e-mail.

### **Agosto de 2013**

01/08 - Ida até Campinas:

Laboratório de ensino: conversa com o monitor Lucas e Professor Mauro sobre o local de instalação do tanque. O professor Mauro mostra a rede de abastecimento de água. Problema: contatar os técnicos de manutenção para a liberação da rede de água.

Primeiros cálculos e simulações na Engenharia Civil.

06/08

Professor Pécio Leister de Almeida Barros (Faculdade de Engenharia Civil) aceita ser meu co-orientador. Pedi a ele que enviasse um email ao professor Lunazzi.

07/08 - Professor Lunazzi confirma recebimento dos emails do orientador e co-orientador.

09/08 - Monitor Lucas (do LIEF) responde email sobre a instalação de torneira no Laboratório.

13/08 - Conversa (via telefone) com o professor Lunazzi sobre os dois modos de construção do simulador.

14/08 - Solicitação ao professor Kléber para opinar sobre o pré-projeto que será postado.

16/08 - Projeto aprovado pelo professor Lunazzi.

21/08 - Projeto corrigido aprovado pelo professor Lunazzi.

25/08 - Finalização da construção do Tanque.

31/08 - Participação como monitor na UPA - Apresentação da areia movediça em tanque com escala real.

### **Setembro de 2013**

02/09 - Ida ao LIEF para verificar possibilidade de abertura do laboratório no período noturno para o despacho do tanque. Falei com o monitor Rogério.

09/09 – Levei o tanque principal para o LIEF.

13/09 – Compra de vidros e início da construção do tanque de realimentação (reabastecimento).

16/09 – Início da cotação dos preços de bombas de aquário.

20/09 – Estudo teórico: selecionando a teoria a partir de apostilas online.

### **Outubro de 2013**

02/10 – Compra da bomba de aquário, tubos, mangueira e uma placa de isopor (itens faltantes). O tanque de reabastecimento chega ao LIEF.

03/10 – Instalação dos tanques no LIEF.

09/10 – Professor Kleber responde o email dizendo que está em viagem.

Os resultados atingidos foram satisfatórios. O simulador já está apto ao funcionamento; portanto o projeto está finalizado (montagem do equipamento).

### 3. Fotos da experiência



Figura 2 – Tanque principal finalizado.



Figura 3 – Vista lateral do tanque principal. Detalhe para o flange lateral.



Figura 4 – Tanque principal – vista frontal.



Figura 5 – Vista superior do tanque principal.



Figura 6 – Flange lateral com adaptador de mangueira de meia polegada (tanque principal).



Figura 7 – Abertura superior na divisória do tanque principal para a vazão de água.



Figura 8 – Flange com adaptador de mangueira de meia polegada.



Figura 9 – Tanque de realimentação finalizado – observe que um dos flanges foi instalado na parte superior, onde ocorrerá a entrada da mangueira vinda do tanque principal.



Figura 10 – Instalando o cano para direcionar o fluxo no meio do tanque.



Figura 11 – Cano de direcionamento de fluxo central instalado.



Figura 12 – Colocação das britas maiores.



Figura 13 – Britas menores antes da lavagem.



Figura 14 – Colocação das britas menores depois da lavagem.



Figura 15 – Detalhe dos materiais utilizados: mangueira, registro, adaptador de mangueira, cano e bomba de aquário de 1000 L/h, além do tanque principal ao fundo.



Figura 16 – Início da colocação da areia.



Figura 17 – A colocação da areia foi finalizada.



Figura 18 – esquentando a mangueira para colocá-la no adaptador.

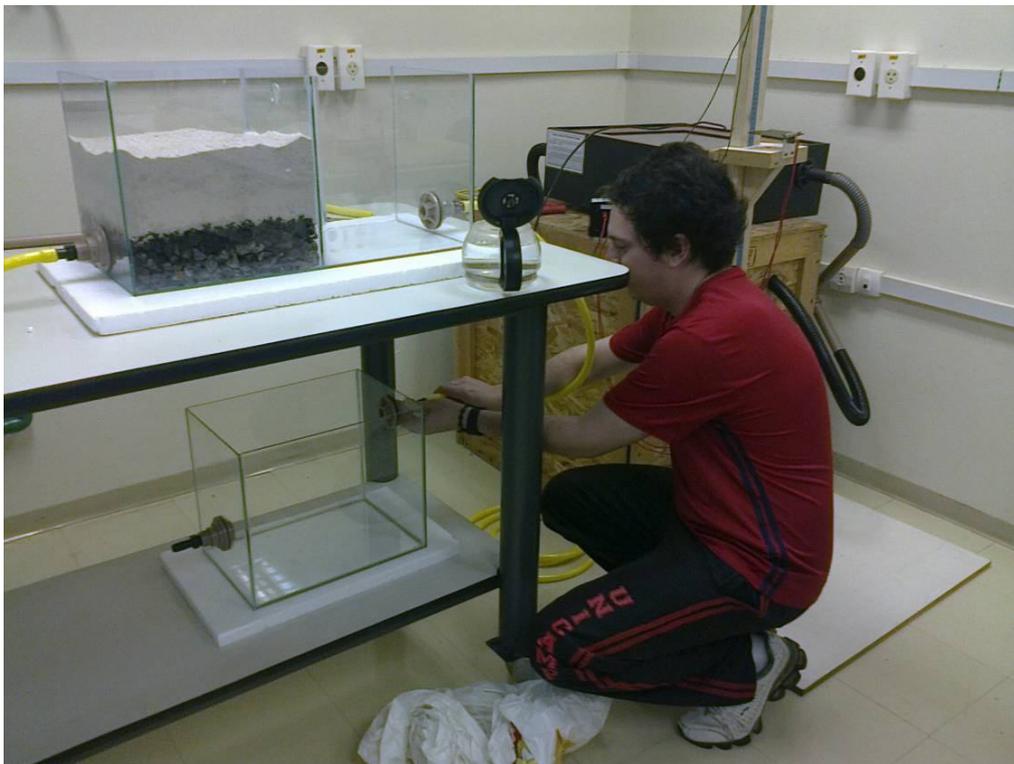


Figura 19 – Encaixe da mangueira no tanque de realimentação.



Figura 20 – Esquentando a mangueira para encaixá-la no registro.

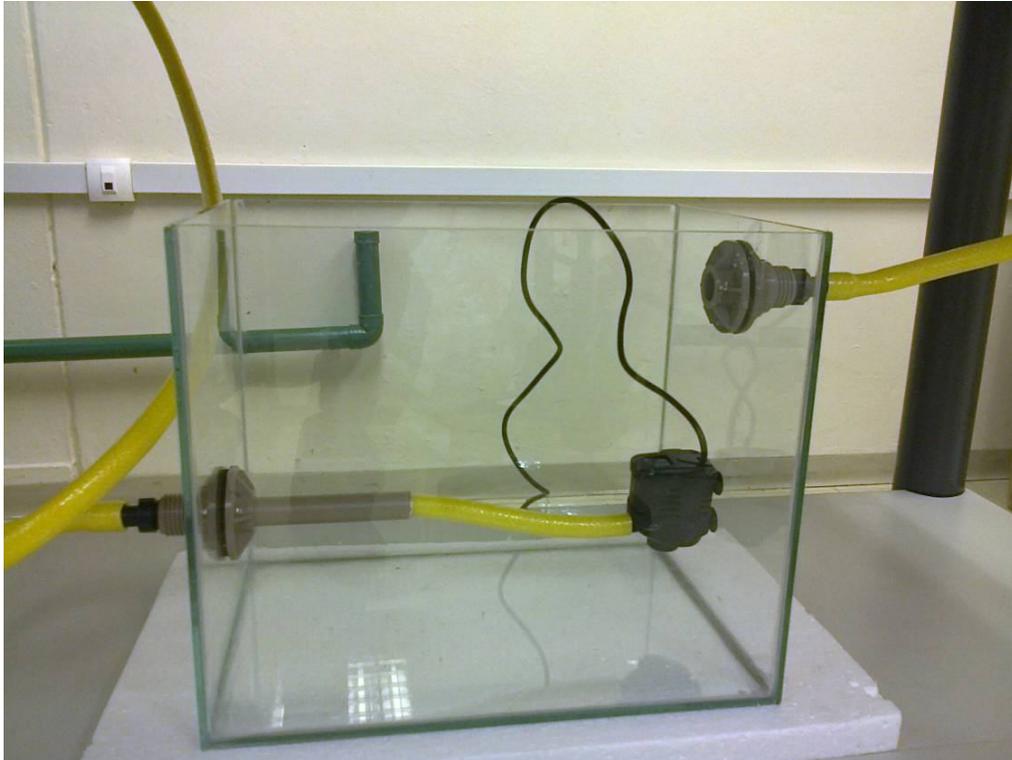


Figura 21 – Tanque de realimentação: a bomba foi instalada com ventosas na parede direita com uma mangueira que conecta o fluxo de água da bomba ao cano de realimentação.



Figura 22 – Enchendo o tanque principal com água para os primeiros testes, A água estava bem turva.



Figura 23 – Detalhe da água turva.

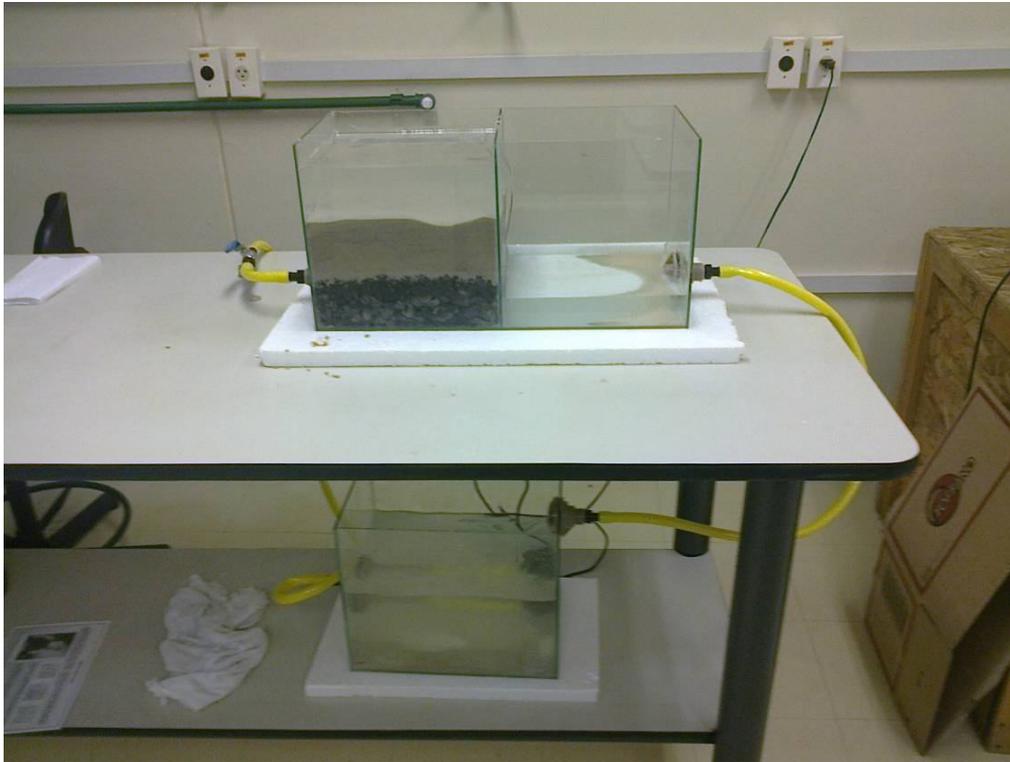


Figura 24 – Primeiro teste de funcionamento. A bomba foi regulada para operar em aproximadamente 500 L/h. O sistema de realimentação mostrou-se eficaz. No entanto, a água estava turva.



Figura 25 – Primeiros sinais de ocorrência de areia movediça na região lateral.

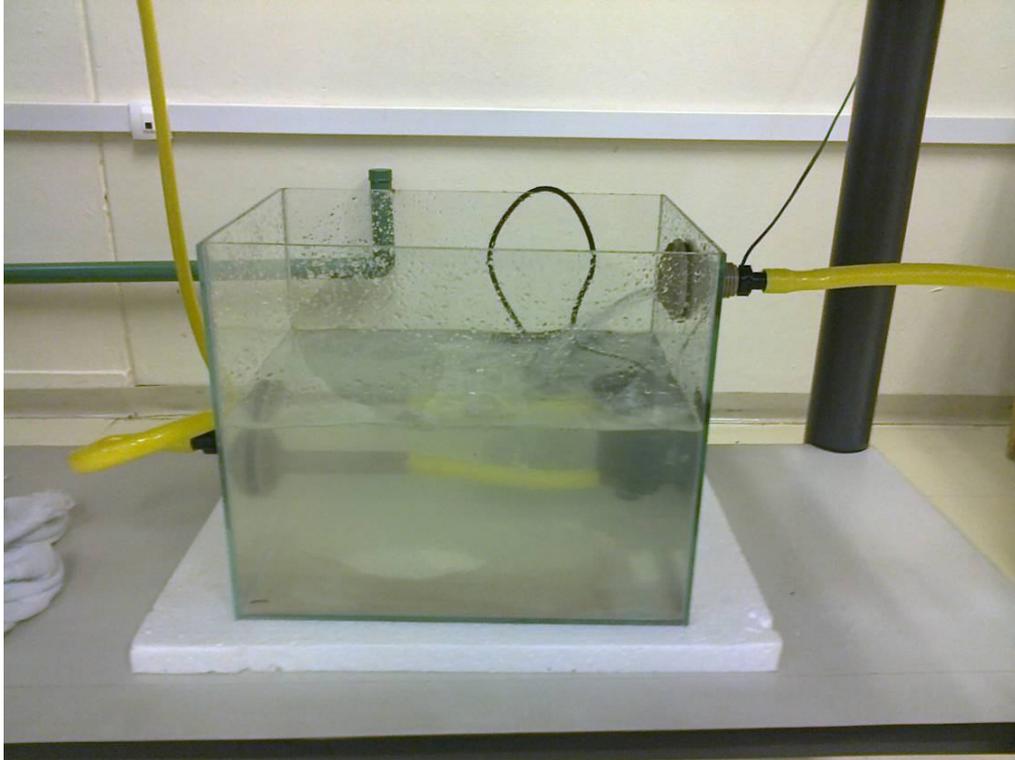


Figura 26 – Tanque de realimentação funcionando.



Figura 27 – Tanque de realimentação: fluxo de água vindo do tanque principal.

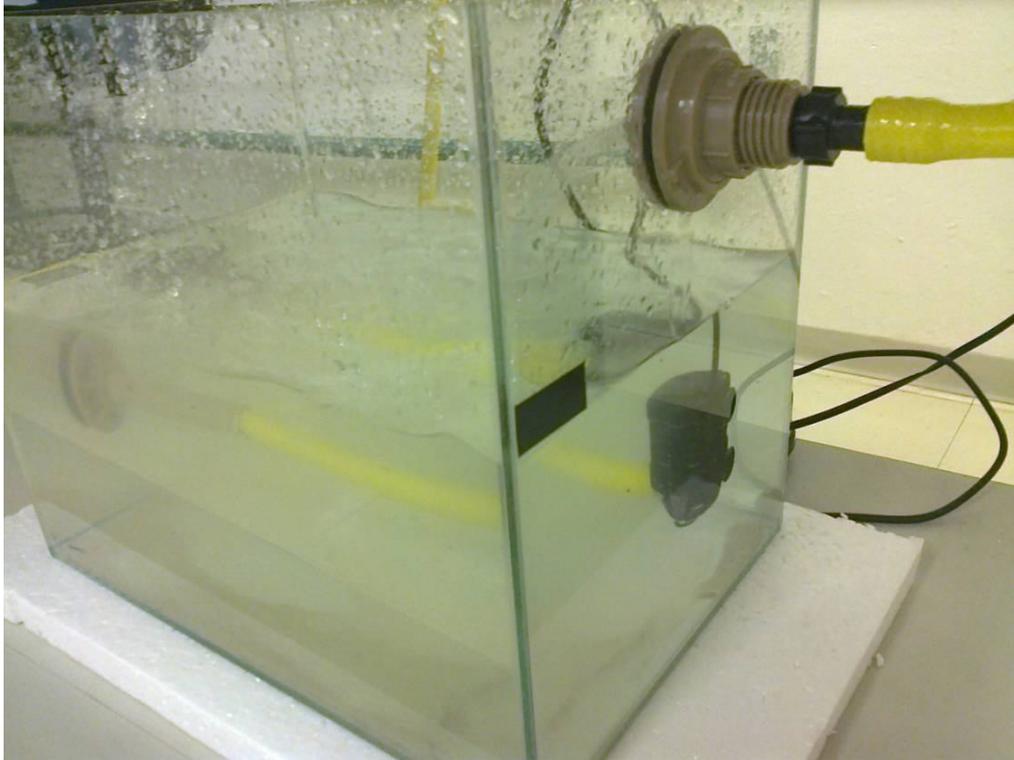


Figura 28 – Marcador de nível (fita preta) ideal de água para operação do tanque de reabastecimento.

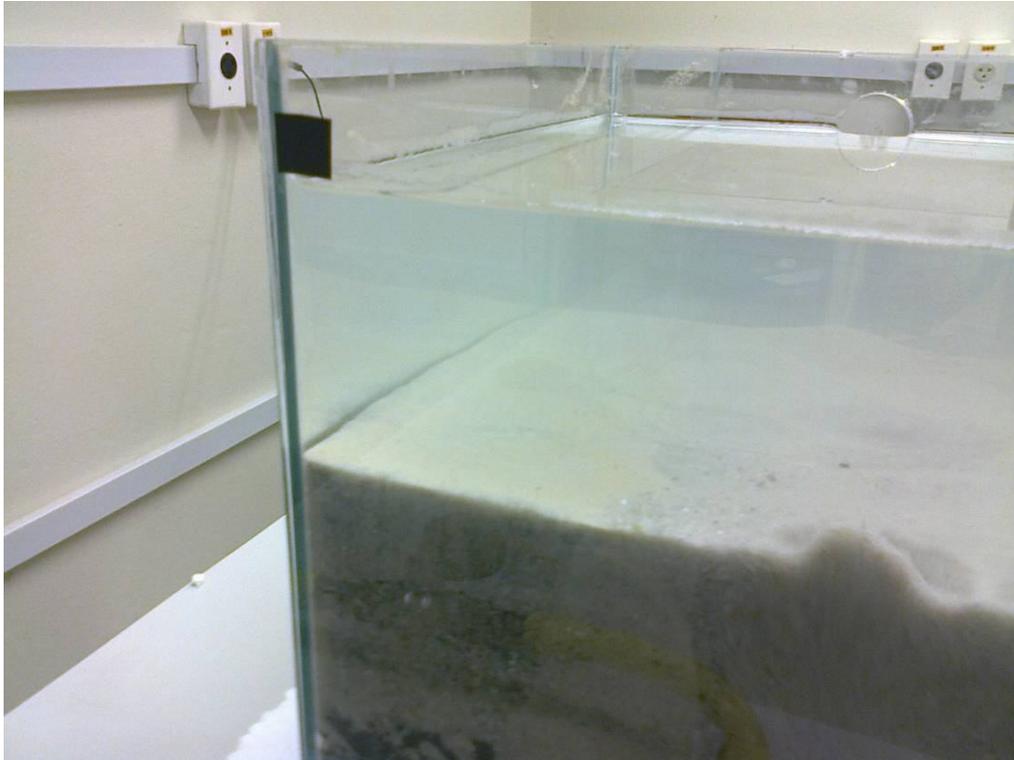


Figura 29 – Marcador de nível (fita preta) no tanque principal.

#### 4. Dificuldades encontradas

A primeira dificuldade encontrada foi na montagem dos tanques, pois, necessariamente, deveria ser com materiais transparentes: neste caso as opções seriam em acrílico ou em vidro. A segunda opção foi a escolhida por ser menos cara. Outra dificuldade encontrada foi na questão da instalação do tanque de realimentação, pois ninguém sabia se daria certo, tendo em vista que o projeto original da FEC/UNICAMP foi realizado com a instalação direta da mangueira vinda de uma torneira e o ladrão conectado ao esgoto. No dia 10 de Julho (conforme diário de bordo do ensino aberto), estive na Faculdade de Engenharia Civil para fazer as medições de vazão necessária para o funcionamento do simulador. A escolha pela bomba de 1000L/h estava ligada ao fato de permitir a variação do fluxo de água (de 400 a 1000 L/h). Vale ressaltar ainda que no projeto da FEC a abertura dos flanges e mangueiras possuem o valor de uma polegada, ao passo que o meu é de meia polegada.

Durante a instalação do simulador no LIEF, a areia deixou a água bastante turva. Tentei inicialmente retirá-la para lavagem. Resolvi então deixar a água circulando e após 2 horas mostrou-se uma água límpida.

#### 5. Pesquisa realizada

Inicialmente a pesquisa realizada na internet foi sobre a equação de Bernoulli e areia movediça, conforme destacada na imagem a seguir:

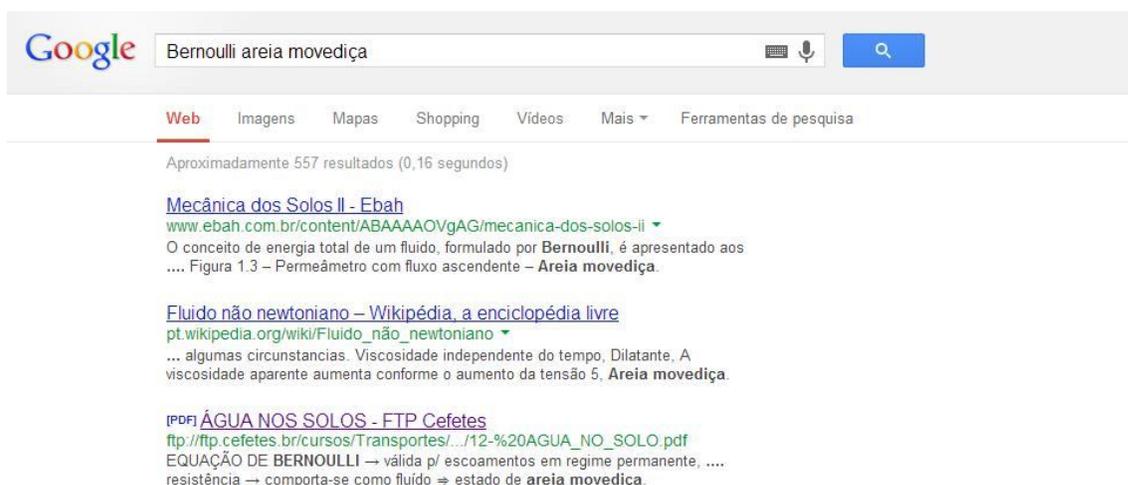


Figura 30 – Imagem da pesquisa realizada no Google.

É interessante ressaltar que o tema areia movediça apareceu no livro de Física II do Halliday, conforme é destacado a seguir:

70 Suponha que seu corpo tenha uma densidade uniforme 0,95 vez a da água. (a) Se você flutua em uma piscina, que fração do volume de seu corpo está acima da superfície da água?  
 A areia movediça é um fluido produzido quando a água é forçada a subir através da areia, separando os grãos uns dos outros de modo que eles perdem o atrito que os mantém fixos. Poços de areia movediça podem se formar quando a água das encostas escorre para os vales e são drenadas em bolsões de areia. (b) Se você pisar em um poço profundo de areia movediça que tenha densidade 1,6 vez a da água, que fração do seu corpo fica acima da superfície da areia movediça? (c) Em particular, você fica submerso o suficiente para poder respirar?

Figura 31 – Questão do Capítulo 14 do Halliday, cujo tema é areia movediça.

A solução é destacada a seguir:

To be as general as possible, we denote the ratio of body density to water density as  $f$  (so that  $f = \rho/\rho_w = 0.95$  in this problem). Floating involves equilibrium of vertical forces acting on the body (Earth's gravity pulls down and the buoyant force pushes up). Thus,

$$F_b = F_g \Rightarrow \rho_w g V_w = \rho g V$$

where  $V$  is the total volume of the body and  $V_w$  is the portion of it which is submerged.

(a) We rearrange the above equation to yield

$$\frac{V_w}{V} = \frac{\rho}{\rho_w} = f$$

which means that 95% of the body is submerged and therefore 5.0% is above the water surface.

(b) We replace  $\rho_w$  with  $1.6\rho_w$  in the above equilibrium of forces relationship, and find

$$\frac{V_w}{V} = \frac{\rho}{1.6\rho_w} = \frac{f}{1.6}$$

which means that 59% of the body is submerged and thus 41% is above the quicksand surface.

(c) The answer to part (b) suggests that a person in that situation is able to breathe.

Figura 32 - Resolução do exercício da figura 31.

E ainda, em termos de curiosidade, destaca-se:

The image shows a screenshot of the National Geographic News website. The main article is titled "Quicksand Science: Why It Traps, How to Escape". The article text explains that the increase in viscosity of quicksand is due to the formation of sand sediment, which has a very high viscosity. It also mentions that water has to be introduced into the sand sediment to loosen it, and this requires considerable amounts of force. The authors estimate that the force needed for someone to pull their foot out of quicksand at a speed of a centimeter a second would be the equivalent of that required to lift a medium-size car.

The article includes a quote from co-author Daniel Bonn: "If you do step into quicksand, says study co-author Daniel Bonn, you'll only sink in a little deeper than your waist. 'I would say there would be some pressure on the chest, but not enough to cause serious trouble.'"

The article also discusses the "Origins of the Myth" and suggests that a person will gradually begin to sink in quicksand, and movement will make the victim sink faster. This may be the origin of the advice to "never struggle if you're caught in quicksand."

The article concludes with the advice: "But no amount of struggling will send you in over your head. Bonn suggests that it isn't struggling that can get you into trouble, but getting caught in quicksand near the sea, which is generally where quicksand is found. When the high tide comes in, you could drown."

The article is part of a series of "LATEST NEWS VIDEOS" and "LATEST PHOTO NEWS". The "LATEST PHOTO NEWS" section includes "SPACE PHOTOS THIS WEEK: Tiny Galaxy, Sun's Iron, More" and "LATEST VIDEO NEWS" includes "Stuck Mars Rover About to Die?".

The article is also featured in the "Most Viewed News" section and is part of an advertisement for "LIVE THE DIGITAL NOMAD'S JOURNEY" by Andrew Evans.

The website includes a navigation menu on the left with categories such as HOME, ANIMALS, DAILY NEWS, ENVIRONMENT, GAMES, GREEN GUIDE, HISTORY, KIDS, MAPS, MUSIC, PHOTOGRAPHY, SCIENCE & SPACE, TRAVEL & CULTURES, and VIDEO. There is also a "Shop Our Store" section with various products like books, clothing, and maps.

The article is dated Thursday, October 28, 2010, and is on page 2 of 2.

Figura 33 – Curiosidade: como escapar da areia movediça.

## 6. Descrição do trabalho em termos dos níveis de ensino.

### a) Público em geral

Para o público em geral, pode-se descrever o trabalho do seguinte modo:

“Podemos observar que o pesinho (ver figura abaixo) sobre a areia não afunda porque a areia oferece certa resistência. No entanto, quando aumentamos o fluxo de água vindo de baixo para cima, a areia vai perdendo a resistência em alguns pontos. Quando ela se comportar como um líquido, teremos o fenômeno da areia movediça.”



Figura 34 – “Peso” utilizado no experimento.

### b) Ensino Médio

Uma abordagem interessante para os alunos do ensino médio é mostrar a mudança do regime estático para o dinâmico, focando na força de atrito existente entre os grãos de areia. Outra questão está centrada em mostrar os vetores que atuam no experimento, conforme pode ser destacado nas imagens a seguir:



Figura 35 – Representação das forças Peso e de Atrito.



Figura 36 – A força de atrito está diminuindo devido à percolação de água de baixo para cima. A componente Peso se mantém inalterada.



Figura 37 – Quando o atrito entre os grãos diminui drasticamente, o pesinho afunda, já que a componente desta força se mantém inalterada.

Nas imagens acima é possível perceber uma aplicação do estudo de grandezas vetoriais aos alunos do ensino médio. Na figura 35, o pesinho se mantém em regime estático devido ao fato das componentes da força peso e de atrito serem iguais; na figura 36, supondo que está havendo um fluxo de água de baixo para cima, o atrito entre os grãos diminui, e o pesinho começa a afundar, tendo em vista que a componente peso não é alterada. Já na figura 37, o atrito entre os grãos praticamente não mais existe, e assim o pesinho começa a afundar por completo.

### c) Ensino Superior

Bernoulli formulou o conceito da conservação da energia total de um fluido:

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constante} \quad (1)$$

Onde:

- $V$  = velocidade do fluido na seção considerada.
- $g$  = aceleração gravitacional.
- $z$  = altura na direção da gravidade desde uma cota de referência.
- $P$  = pressão ao longo da linha de corrente.
- $\rho$  = densidade do fluido.

A equação (1) pode ser reescrita de tal modo que represente a energia total em um ponto do fluido, expressa em termos da razão energia/peso. Deste modo:

$$h_{total} = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Onde  $h_{total}$  é a energia total do fluido,  $z$  é a cota do ponto considerado com relação a um dado referencial padrão,  $u$  é o valor da pressão neutra,  $v$  a velocidade de fluxo da partícula e  $g$  é o valor da aceleração gravitacional.

A equação (2) permite que seja dado um tratamento em termos da energia específica de um fluido, que será considerada no processo de percolação de água. Para a maioria dos casos, o termo da energia cinética  $v^2/2g$  da equação (2) pode ser desprezada. Deste modo, simplifica-se a equação 2:

$$h_{total} = z + \frac{u}{\gamma_w} \quad (3)$$

Onde  $z$  representa a diferença de cota entre o ponto considerado e o nível de referência. ,

→ Força de Percolação

Inicialmente, vamos definir  $h$  (da equação 3) como o potencial total da água no solo. O potencial total pode ser definido, de maneira mais simples, como sendo a soma de cota atirgida pela água e a cota do plano de referência. Deste modo, tem-se a seguintes situações:

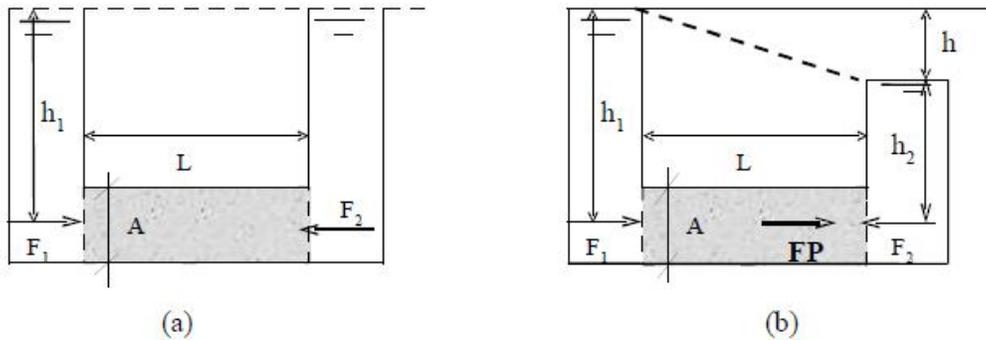


Figura 38 – Força de percolação em duas situações: em (a) força de percolação é nula. Em (b), a força de percolação  $FP$  atua da esquerda para a direita, pois o potencial do lado esquerdo (representado por  $F_1$ ) é maior do que o potencial em  $F_2$ .

Quando ocorre movimentação de água no solo, esta transfere energia às partículas do solo, devido ao atrito viscoso que se desenvolve. A energia transferida é medida, então, pela perda de carga e a força correspondente a essa energia é chamada de força de percolação. Esta força tende a carregar as partículas.

Na figura 38-b observa-se que temos duas cargas,  $h_1$  e  $h_2$ , e, portanto, duas forças:  $F_1$  e  $F_2$ , e deste modo a força total será:

$$Fp = F_1 - F_2 = \gamma_w \cdot A \cdot (h_1 - h_2)$$

$$Fp = \gamma_w \cdot V \cdot i$$

$$fp = \gamma_w \cdot i \quad (4)$$

Onde a equação 4 representa a força de percolação por unidade de volume.

O fenômeno da areia movediça vai ocorrer quando tivermos a perda da estabilidade de uma massa de solo por efeito da percolação de água. Na figura 39 é apresentado um fluxo de água ascendente, onde a percolação da água da direita para a esquerda, em virtude da carga  $h$  que é dissipada pelo atrito. Deste modo a resultante das forças será nula.

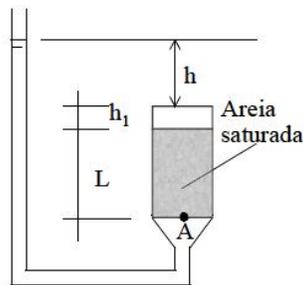


Figura 39 – Condições para a ocorrência do fenômeno de areia movediça.

É necessário ainda que a força de percolação seja igual ao peso submerso do solo. Fazendo o equilíbrio no ponto A da figura acima, tem-se que:

Tensão total:

$$\sigma_A = \gamma_w \cdot h_1 + \gamma_{\text{sat}} \cdot L \quad (5)$$

Pressão neutra

$$u_A = \gamma_w \cdot (h_1 + L + h) \quad (6)$$

Igualando-se as equações (5) e (6):

$$i_c = \frac{h_c}{L} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (7)$$

Onde a equação (7) representa o gradiente hidráulico crítico ( $i_c$ ). Quando o gradiente hidráulico for maior ou igual a  $i_c$ , ocorrerá o fenômeno de areia movediça.

## 7. Declaração do orientador

“Meu orientador concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião:

“O aluno foi bastante feliz ao escolher este experimento, me parece bastante interessante. O relatório demonstra que o estudante trabalhou bem e concluiu com sucesso sua proposta. Por outro lado, observo pequenas inconsistências na análise física do problema, principalmente quando entre uma força de atrito na explicação. Sugiro ao aluno que siga trabalhando um pouco mais na explicação para o ensino médio e busca nas referências originais o porque se considera uma força de atrito na explicação do problema”.

## 8. Apresentação

Gostaria, se possível, de escolher o dia 13 de Novembro para a apresentação deste trabalho. Quanto ao horário de apresentação, prefiro apresentar no primeiro horário.

## 9. Referências Bibliográficas

Das, Braja M.

Fundamentos de engenharia geotécnica / Braja M.

Pérsio Leinster de Almeida Barros. – São Paulo: Thomson Learning, 2007

Apostila sobre água nos solos:

[ftp://ftp.cefetes.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Apostila%20FURG%20Solos/12-%20AGUA\\_NO\\_SOLO.pdf](ftp://ftp.cefetes.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Apostila%20FURG%20Solos/12-%20AGUA_NO_SOLO.pdf)

Acessado em: 08/10/2013

Apostila Mecânica dos Solos:

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAOVgAG/mecanica-dos-solos-ii>

Acessado em: 08/10/2013.

Physics, 5th Edition, Volume 2, 5th Edition

Resnick, Robert; Halliday, David; Krane, Kenneth S. / John Wiley & Sons