

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 FINAL



Yuri Alexandre Meyer  
RA 083113

yuri\_meyer x yahoo.com.br

Orientador: Prof. Dr. Kleber Roberto Pirola  
<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  
11 de Novembro de 2013

## Agradecimentos

---

Agradeço primeiramente ao meu pai – *in memoriam* – por ter me ensinado, desde a minha infância, os segredos da mecânica dos solos e a importância da educação.

Agradeço ao Prof. Dr. José Joaquin Lunazzi pela compreensão e atendimento nas dúvidas, bem como às diretrizes dadas na disciplina que enriquecem a nossa formação. Sou grato aos orientadores Prof. Dr. Kleber Pirola e Prof. Dr. Pécio Leister de Almeida Barros pela atenção dada e análise do trabalho final, bem como os senhores Reinaldo e Cipriano (FEC-UNICAMP) pela ajuda prestada na montagem do experimento.

Yuri Alexandre Meyer

## 1. Resumo

---

O projeto em questão tem como objetivo fornecer uma metodologia experimental para o ensino da Hidrostática (Empuxo) a nível médio, Mecânica dos Solos (técnico e superior em Engenharia Civil) e Hidrodinâmica (Equação de Bernoulli) no ensino superior. Trata-se de um projeto que poderá ser utilizado também a nível de pós-graduação na área de Dinâmica dos Fluidos.

## 2. Idéia Motivadora

---

Tendo em vista que o fenômeno da areia movediça é algo que intriga as pessoas, estando imortalizada, sobretudo, no cinema, o objetivo central foi proporcionar um experimento que atraísse a atenção do público, facilitando o aprendizado em Física.

A Física é a ciência que estuda os fenômenos da natureza. Neste âmbito, o ensino deve ser focado em acontecimentos que nos cercam. O ensinamento através da curiosidade do público alvo é a melhor metodologia para consolidar uma verdadeira educação.



Figura 1 – Cena do filme Indiana Jones e o Reino da Caveira de Cristal – 2008, onde uma das personagens fica presa na areia movediça.

### 3. A Física no fenômeno da areia movediça

---

#### 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 comporta como um líquido, teremos o fenômeno da areia movediça.”



Figura 2 – “Peso” utilizado no experimento.

#### b) Ensino Médio

Uma abordagem interessante para os alunos do ensino médio é mostrar o empuxo.

Seja o enunciado do Princípio de Arquimedes:

“Quando um corpo está total ou parcialmente submerso em fluido, este exerce uma força de empuxo sobre o corpo. A força de empuxo está dirigida para cima e possui intensidade igual ao peso (mg) do fluido que foi deslocado pelo corpo”.

Seja a massa de um corpo deslocado dado por

$$m = d.V \quad (1)$$

onde  $d$  = densidade e  $V$  o volume do corpo. Tendo em vista a definição do empuxo pode-se escrever que:

$$P = m.g \quad (2)$$

Onde  $P$  é o Peso do corpo.

Substituindo-se (1) em (2), segue-se que:

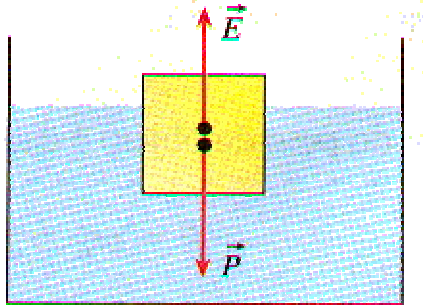
$$P = d.v.g$$

Mudando  $P$  para  $E$ :

$$E = d.g.v \quad (3)$$

Que é a equação do Empuxo.

A figura 3 a seguir representa o Peso e a força de empuxo:



Uma pergunta interessante que os expectadores poderão fazer: a força de empuxo acontece em fluidos. A areia é um fluido?

A percolação de água, de baixo para cima, provoca uma mudança do regime estático para dinâmico, fazendo com que a areia se comporte como um líquido e, portanto, um fluido.

A nível de ensino médio, pode-se explorar o simulador como um experimento prático sobre o empuxo. Um exercício interessante para os alunos resolverem é o seguinte:

---

---

Suponha que o seu corpo possua uma massa específica uniforme de 0,95 vezes a da água. A areia movediça é um fluido que é produzido quando a água é forçada para cima a entrar na areia, movendo os grãos da areia para longe uns dos outros, de modo que eles não mais se mantêm unidos pela força de atrito. Poços de areia movediça podem surgir quando a água vinda das montanhas alcança vales com bolsões de areia. Responda:

- a) Se você pisar em um poço profundo de areia movediça com uma massa específica de 1,6 vezes a da água, que fração do volume do seu corpo estará então acima da superfície da areia?
- b) Em particular, você está submerso o suficiente para respirar?

A viscosidade da areia aumenta drasticamente com quaisquer movimentos rápidos. Assim, quanto mais se debater, mais fortemente a areia irá segurá-lo.

- c) Como você poderia escapar sem a ajuda de alguém?

**Observação: A resolução deste exercício está no anexo.**

---

---

#### d) 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 atingida pela água e a cota do plano de referência. Deste modo, tem-se as seguintes situações:

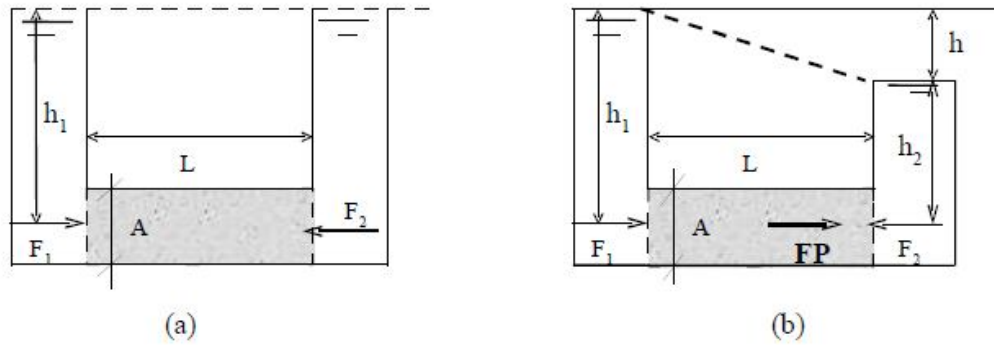


Figura 4 – Força de percolação em duas situações: em (a) força de percolação é nula. Em (b), a força de percolação FP atua da esquerda para a direita, pois o potencial do lado esquerdo (representado por  $F_1$ ) é maior do que o potencial em  $F_2$ .

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 4-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 5 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.



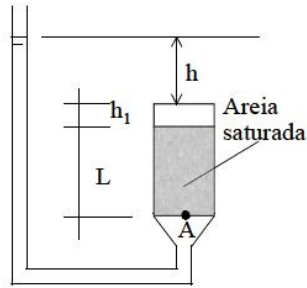


Figura 5 – Condições para a ocorrência do fenômeno de areia movediça.

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:

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

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.

## RESUMO DA TEORIA

---

Sem a percolação da água: os grãos de areia têm uma densidade maior que a da água e portanto afundam. Assim, numa massa composta de grãos de areia (com espaços entre eles), haverá forças nos contatos entre esses grãos, normais ao plano de contato, mesmo que a areia esteja submersa. O coeficiente de atrito entre os grãos, multiplicado por essas forças fornece uma resistência ao cisalhamento da areia, o que dá a ela uma capacidade de suportar a carga de um corpo apoiado sobre essa massa.

Quando ocorre a percolação d'água de baixo para cima, aparecem forças de percolação nessa direção, causadas pelo atrito dinâmico entre as partículas e o fluxo de água. Essas forças causam uma diminuição nas forças normais que atuam nos contatos entre as partículas de areia; e isso causa também uma diminuição na resistência ao cisalhamento, e na capacidade de carga da areia.

As forças de percolação são proporcionais à velocidade da água, que, por sua vez é proporcional ao gradiente hidráulico. Se o gradiente hidráulico for muito grande, as forças de percolação podem anular as forças normais entre as partículas. Nesse ponto, a resistência ao cisalhamento é anulada e a areia passa a se comportar como um fluido.

#### 4. Montagem do experimento

---

Os materiais utilizados para a montagem do experimento são:

- 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.

Observação: a areia que deve ser utilizada é a chamada “areia de construção”, que é bem fina, cujos diâmetros variam entre 0,05 a 0,42 mm.



Figura 6 – Tanque principal finalizado.



Figura 7 – Vista lateral do tanque principal. Detalhe para o flange lateral.



Figura 8 – Tanque principal – vista frontal.



Figura 9 – Vista superior do tanque principal.



Figura 10 – Flange lateral com adaptador de mangueira de meia polegada (tanque principal).



Figura 11 – Abertura superior na divisória do tanque principal para a vazão de água.



Figura 12 – Flange com adaptador de mangueira de meia polegada.



Figura 13 – 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 14 – Instalando o cano para direcionar o fluxo no meio do tanque.



Figura 15 – Cano de direcionamento de fluxo central instalado.



Figura 16 – Colocação das britas maiores.





Figura 17 – Britas menores antes da lavagem.



Figura 18 – Colocação das britas menores depois da lavagem.



Figura 19 – Detalhe dos materiais utilizados: mangueira, registro, adaptador de mangueira, cano e bomba de aquário de 1000 L/h, além do tanque principal ao fundo.

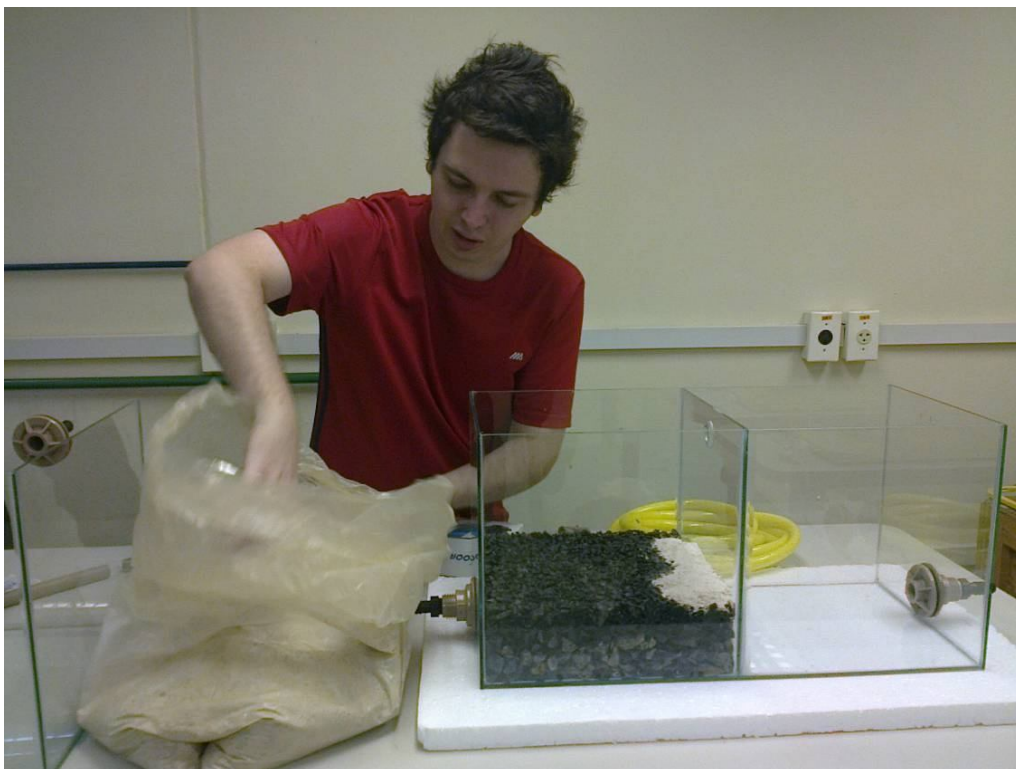


Figura 20 – Início da colocação da areia.



Figura 21 – A colocação da areia foi finalizada.



Figura 22 – Esquentando a mangueira para colocá-la no adaptador.



Figura 23 – Encaixe da mangueira no tanque de realimentação.



Figura 24 – Esquentando a mangueira para encaixá-la no registro.

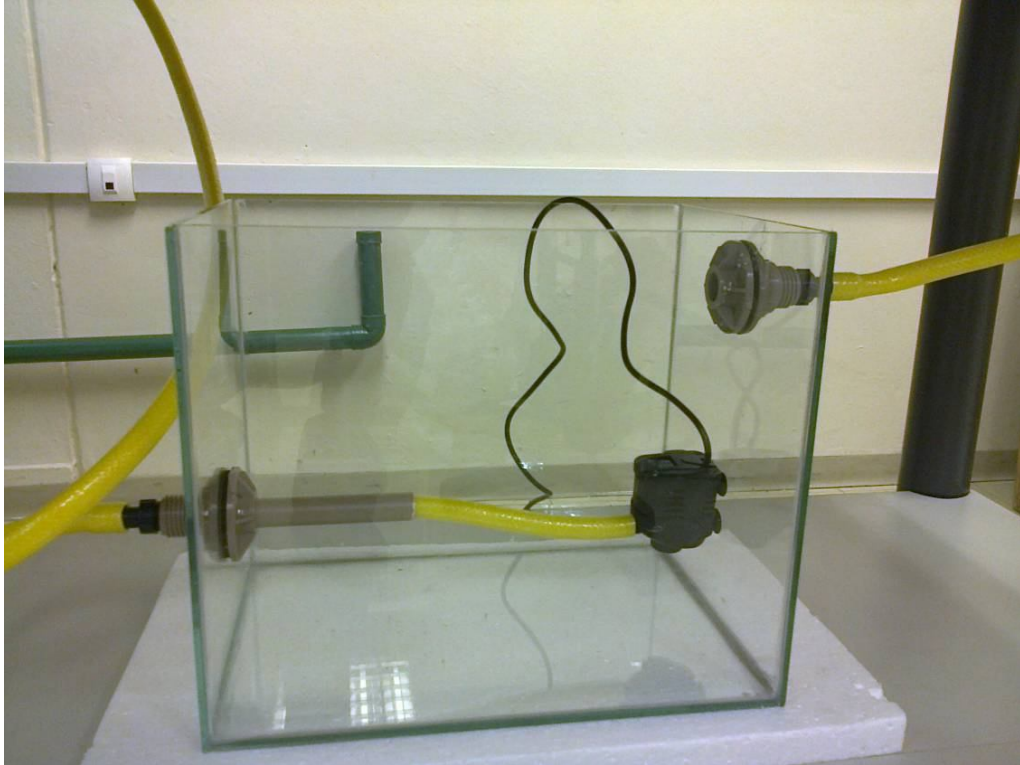


Figura 25 – Tanque de realimentação: a bomba foi instalada com ventosas na parede direita com uma mangueira que conecta o fluxo de água da bomba ao cano de realimentação.



Figura 26 – Enchendo o tanque principal com água para os primeiros testes. A água estava bem turva.



Figura 27 – Detalhe da água turva.

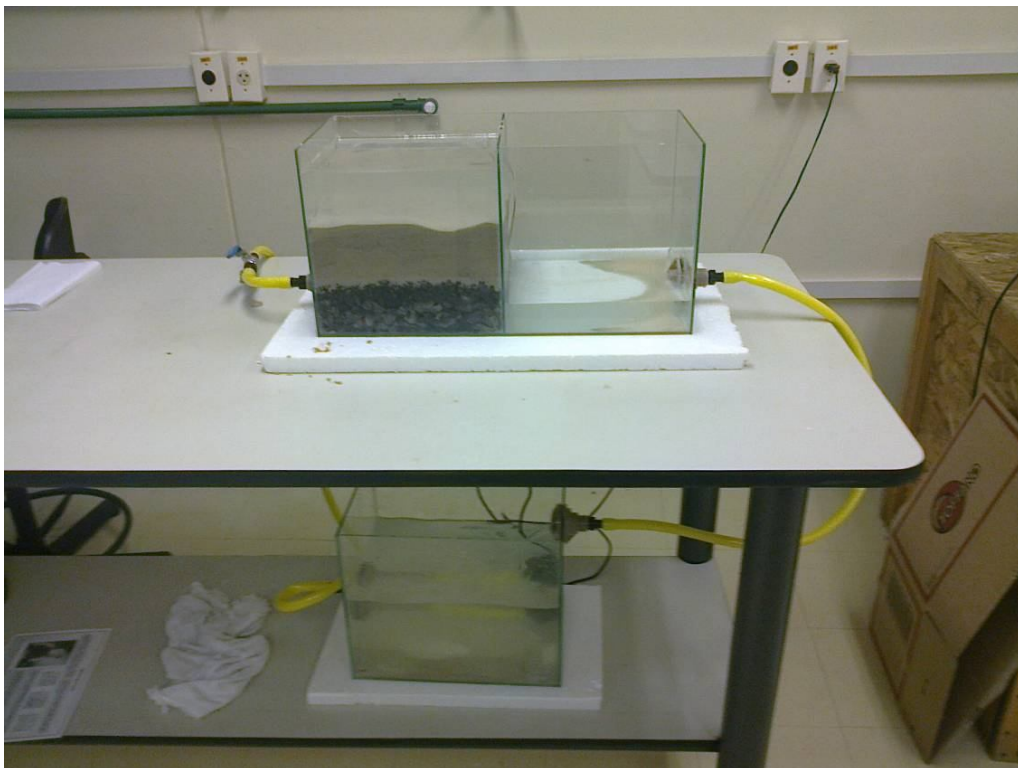


Figura 28 – Primeiro teste de funcionamento. A bomba foi regulada para operar em aproximadamente 500 L/h. O sistema de realimentação mostrou-se eficaz. No entanto, a água ainda estava turva.

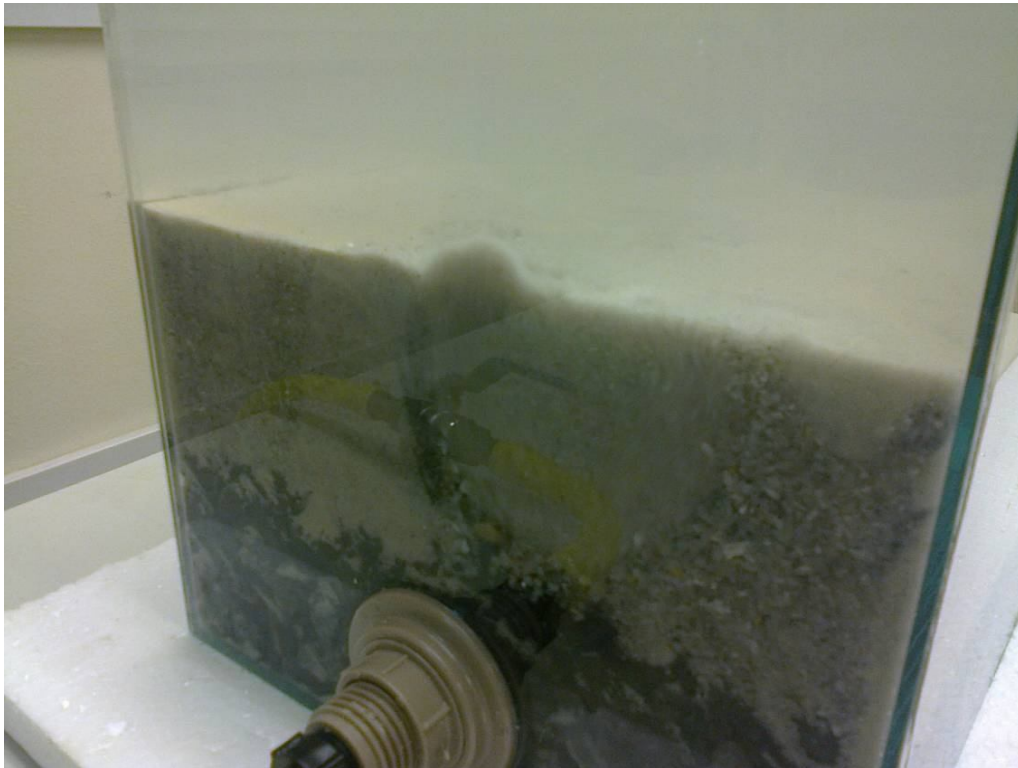


Figura 29 – Primeiros sinais de ocorrência de areia movediça na região lateral.

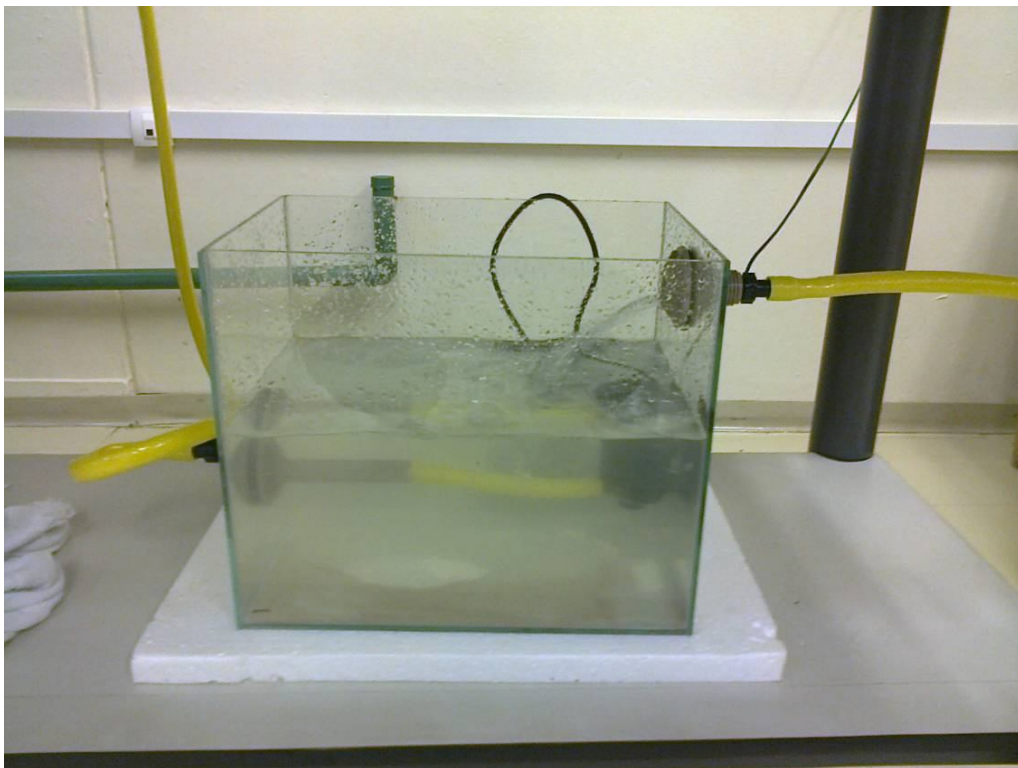


Figura 30 – Tanque de realimentação funcionando.



Figura 31 – Tanque de realimentação: fluxo de água vindo do tanque principal.

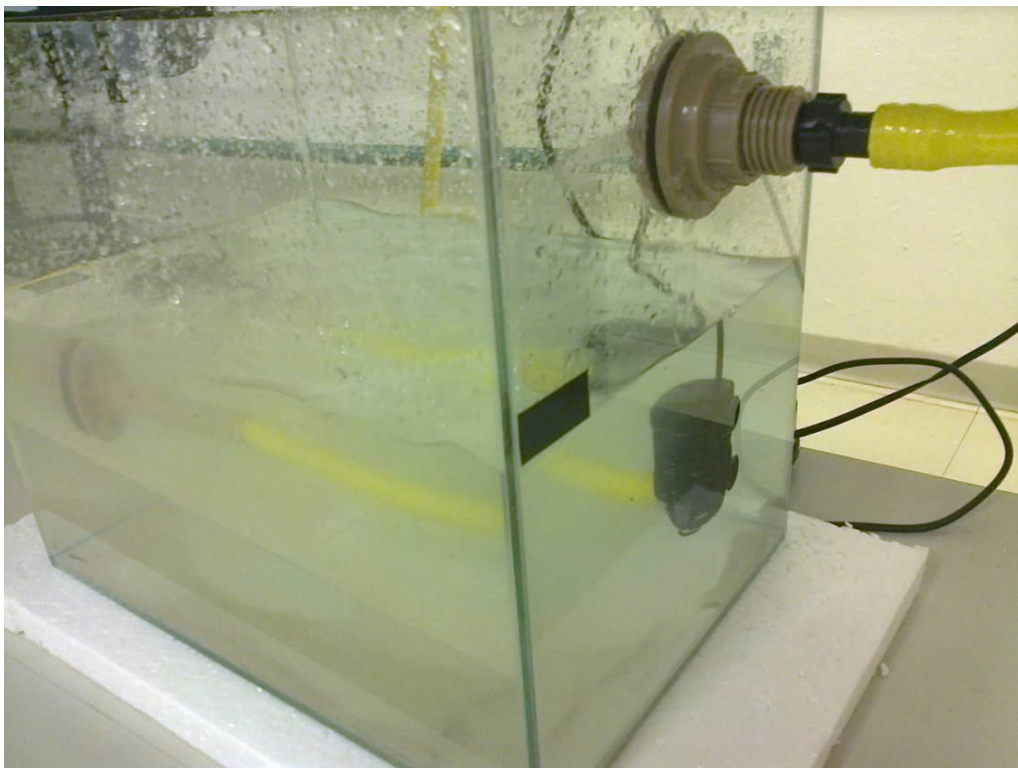


Figura 32 – Marcador de nível (fita preta) ideal de água para operação do tanque de reabastecimento.



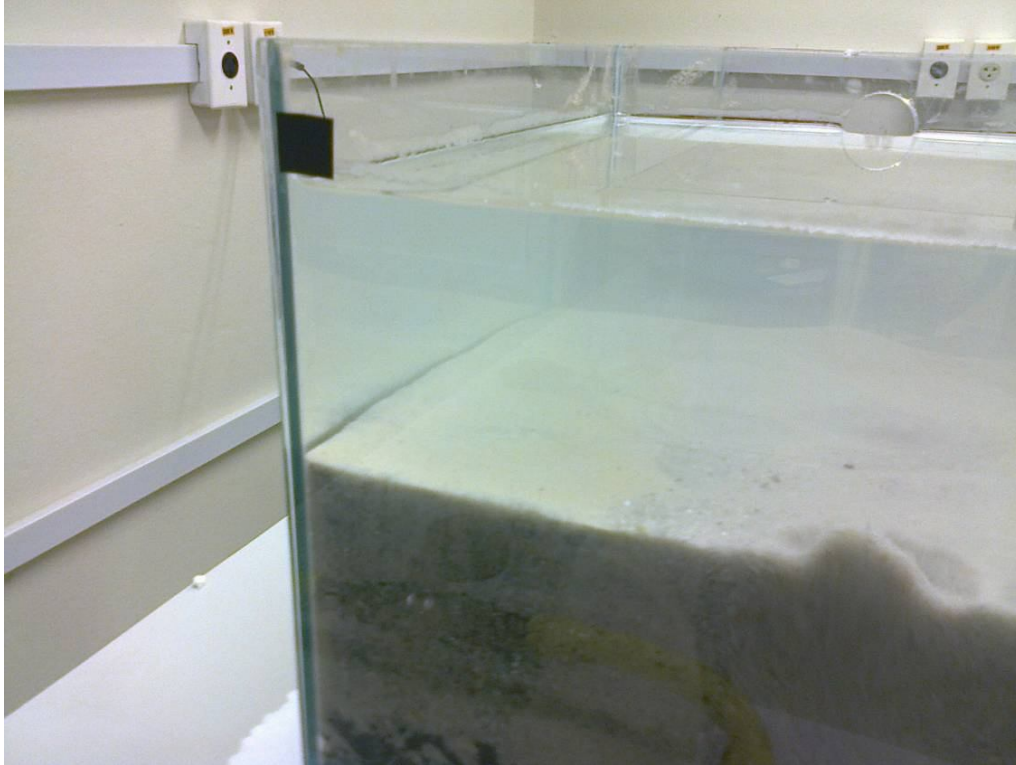


Figura 33 – Marcador de nível (fita preta) no tanque principal.

## 5. Dificuldades encontradas

---

A primeira dificuldade encontrada foi na montagem dos tanques, pois, necessariamente, deveria ser com materiais transparentes e, neste caso, as opções seriam em acrílico ou em vidro. A segunda opção foi 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 relacionada 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 possui 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.

## 6. Declarações do orientador

---

### 6.1 Declaração no relatório parcial:

“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 referencias originais o porque se considera uma força de atrito na explicação do problema”.

### 6.2 Declaração no relatório Final:

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

O proponente, Yuri Meyer, concluiu seu relatório satisfatoriamente, seguindo as instruções e correções sugeridas no relatório parcial. Baseado em uma montagem simples, porém muito bem feita, o estudante realizou um experimento bastante interessante. Simulou o fenômeno da areia movediça e descreveu tal experimento neste relatório final. Durante o desenvolvimento do trabalho, o estudante demonstrou interesse e independência, buscando na literatura trabalhos associados ao tema. Considero o trabalho concluído de acordo com o proposto inicialmente, de forma muito satisfatória.

## 7. Referências Bibliográficas

---

Das, Braja M.

Fundamentos de engenharia geotécnica / Braja M.

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

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

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

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)

Acesso em: 08/10/2013

Apostila Mecânica dos Solos:

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

Acesso em: 08/10/2013.

## Anexo – Resolução do exercício proposto

---

Seja a fração entre as densidades igual a 0,95, expressa por:

$$F_b = F_g \Rightarrow \rho_w g V_w = \rho g V \quad (1)$$

$V$  = volume total do corpo.

$V_w$  = Volume da parte submersa.

Rearranjando a equação (2):

$$\frac{V_w}{V} = \frac{\rho}{\rho_w} = f \quad (2)$$

a) Temos então a interpretação: Se 95% do corpo está submerso, então 5% está acima da água.

b) Seja, segundo o enunciado:

$$\rho = 1,6\rho_w$$

então:

$$\frac{V_w}{V} = \frac{\rho}{1,6\rho_w} = \frac{f}{1,6}$$

Assim: 59% do corpo estará submerso, e 41% acima da areia movediça.

c) Se você afundar até os quadris ou superior, dobre-se para trás. Quanto mais você espalhar o seu peso, mais difícil será afundar. Flutue em suas costas enquanto você lentamente e com cuidado liberta suas pernas. Se você estiver perto da borda da areia movediça, você pode rolar para chão duro. Mantenha sempre a calma e tente flutuar. Pode levar horas, mas você sobreviverá!

