

Modelagem Física de Escorregamentos Submarinos

Gabriel Samarão da Motta

UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, gabrielsamarao@gmail.com

Sérgio Tibana

UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, stibana@gmail.com

Fernando Saboya de Albuquerque Júnior

UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, saboya@uenf.br

Rodrigo Martins Reis

UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, reis@uenf.br

RESUMO:

Apresenta-se neste trabalho resultados e interpretações preliminares de ensaios de estabilidade de taludes submarinos realizados em centrífuga geotécnica. Este estudo teve como objetivo avaliar a escala (g) em que a hidroplanagem deixa de ocorrer, se de fato ocorre, para a lama que foi produzida em laboratório. Foram realizados ensaios de abertura de comporta, monitorados por transdutores de tensão total e de poropressão, fixados numa rampa de acrílico revestida com uma lixa P50, simulando o leito marinho, e foram filmados por uma câmera de alta velocidade. Foram comparados os resultados das imagens com os valores lidos pelos instrumentos. O solo utilizado foi produzido com teores de umidade diferentes para os ensaios preliminares, e posteriormente, variou-se a gravidade induzida na centrífuga em 40, 30, 20 e 10g. Os resultados apresentados (ensaio 3 e 6) geraram comportamentos compatíveis com os encontrados na bibliografia, mostrando que apenas no ensaio 6 a hidroplanagem não ocorreu, como mostrado na posição 6. Para o mesmo ensaio, executado a 10g, as imagens não detectaram indícios de ocorrência da hidroplanagem.

PALAVRAS-CHAVE: Escorregamentos submarinos, hidroplanagem, modelagem física, centrífuga geotécnica.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A demanda energética mundial força cada vez mais ao ser humano a buscar fontes de energia em locais mais remotos, e com o setor de petróleo isso não é diferente: A cada dia, a exploração se dá em poços cada vez mais profundos e distantes do continente.

Os escorregamentos submarinos são fenômenos que ocorrem de forma natural no leito marinho, e se tornaram objeto de estudo devido às atividades no ramo de exploração de petróleo e gás em águas profundas no mundo

inteiro.

A utilização da modelagem física para estudos de escorregamentos submarinos é limitada. Para estudar esse fenômeno a modelagem física vem como grande ajuda na observação da frente de corrida e do percurso do escorregamento em geral, assim como na obtenção das tensões geradas pelo processo.

1.2 Objetivos

O estudo visou a reprodução, através de modelos centrífugados, de uma série de escorregamentos submarinos e estudar o comportamento dessas corridas de lama no leito

marinho, em circunstâncias diferentes. Com a execução do ensaio descrito anteriormente, esperou-se obter uma base de dados para a observação da ocorrência ou não da hidroplanagem.

Este estudo realizou uma bateria de ensaios em modelos reduzidos em centrífuga com várias gravidades induzidas, com filmagens em alta velocidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Escorregamentos Submarinos

Como dito anteriormente, os escorregamentos submarinos são considerados atualmente riscos geológicos, devido ao impacto de suas frentes de terra em equipamentos de exploração offshore de óleo e gás.

Segundo Gue (2012), as características únicas dos deslizamentos de terra submarinos, que são distintos dos deslizamentos normais de terra na superfície, podem ser resumidas da seguinte forma:

- Tamanho enorme, envolvendo grandes volumes de movimentos de massa;
- Distância longa de corrida;
- A ruptura pode ocorrer em inclinações de talude bem suaves.

2.2 Possíveis Condições de Contorno

Como citado por Locat e Lee (2000), as prováveis condições de contorno durante um fluxo de um escorregamento submarino são dispostas de acordo com a Figura 1. Na figura, é possível observar que o material de fluxo é dividido em dois componentes: o material denso e o material em suspensão. A parte densa do fluxo é geralmente associada à corrida de lama, enquanto ao fluxo em suspensão é gerado pelas forças de arraste agindo na superfície superior na parte densa do fluxo (Gue, 2012).

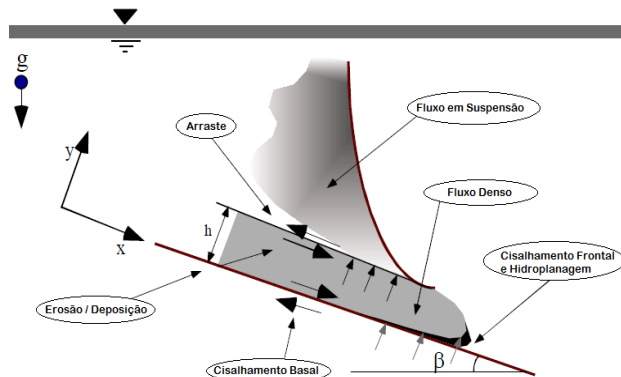


Figura 1: Diagrama esquemático que mostra a geração de uma corrente de turbidez (fluxo em suspensão) por forças de arraste sobre a superfície, a elevação potencial do lobo frontal que conduz ao processo de hidroplanagem, a tensão de cisalhamento basal causando erosão e deposição (Locat e Lee, 2000).

2.3 Mecanismos de Ruptura

Para um talude submarino estável se tornar instável, este pode ser influenciado por diversos fatores, internos ou externos, podendo gerar sua ruptura, e consequentemente, iniciar um escorregamento.

Segundo Locat e Lee (2000), existem diversos mecanismos de gatilho para o início destes escorregamentos, como: o excesso de pressão induzida por sedimentação; ações sísmicas; carregamentos de ondas de tempestades; acumulação rápida do solo e sobreconsolidação; dissociação de hidratos de gás; marés baixas; infiltração; efeitos da erosão; carregamentos glaciais; desprendimento de camas frágeis de solo; entre outras.

2.4 Hidroplanagem de Escorregamentos Submarinos

A hidroplanagem de um fluxo de detritos ou escorregamento requer a parte média ser suficientemente impermeável para pressões de suporte de carga para assim acumular e ser sustentado na camada relativamente fina de água que penetra por baixo dos detritos (Mohrig et al., 1998).

Para que a hidroplanagem ocorra, o solo não pode transformar-se em uma suspensão turbulenta e tem de ser suficientemente móvel de modo a atingir a velocidade crítica. De acordo com Harbitz et al. (2003), se estas condições forem satisfeitas, irá ocorrer a

hidroplanagem quando a pasta fluida não puder deslocar o fluido ambiente rápido o suficiente, isto é, quando a pressão de estagnação hidrodinâmica na frente da pasta fluida, p_f (Equação 2.1), for igual ou superior ao peso por unidade de superfície submersa da pasta fluida, ou a pressão normal, p_d (Equação 2.2).

$$p_f = \frac{\rho_w v_f^2}{2} \quad (2.1)$$

$$p_d = (\rho_d - \rho_w) g h_a \cos \theta \quad (2.2)$$

Onde ρ_w e ρ_d são as densidades da água e da pasta fluida, respectivamente, v_f é a velocidade frontal da pasta com espessura h_a , g é a aceleração da gravidade, e θ é a inclinação do talude (Harbitz et al., 2003).

Para uma melhor visualização de como a hidroplanagem se inicia, a Figura 2 ilustra as tensões normal e de estagnação, e o mecanismo do início da hidroplanagem.

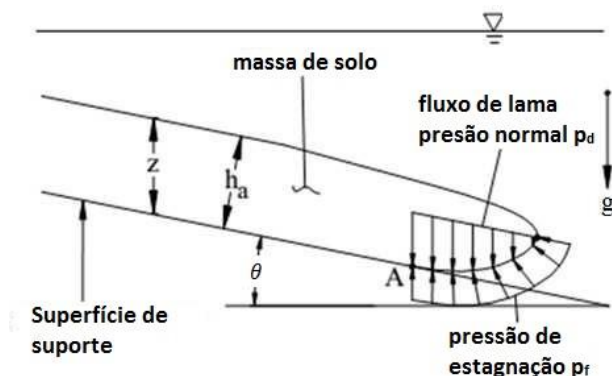


Figura 2: Pressões do fluxo de lama de estagnação e normal geradas na parte frontal do deslizamento (Mohrig et al., 1999).

2.5 Modelagem Física

Os testes de modelos de centrífuga representam uma grande ferramenta para o engenheiro geotécnico, pois permitem o estudo e a análise de problemas usando materiais geotécnicos. A centrífuga geotécnica é uma estrutura onde amostras de solo podem ser testadas de diversas formas (Taylor, 1995).

Uma característica da modelagem geotécnica é a necessidade de reproduzir o comportamento em termos de resistência e rigidez. Existem duas razões para isso: solos são depositados em

camadas, e por isso é possível encontrar diferentes tipos de solo em um local que pode afetar um problema de diferentes formas; e tensões *in situ* mudam com a profundidade, e é de conhecimento notório que o solo se comporta em função do nível e do histórico de tensões. Pela segunda razão a modelagem em centrífuga é de grande uso para o engenheiro (Taylor, 1995).

Os eventos que ocorrem no modelo e no protótipo devem ser semelhantes e a similaridade precisa ser relacionada com leis de escala apropriadas. Na Tabela 2.1 são listadas as leis de escala em centrífuga importantes para o estudo, sendo N a razão entre as dimensões do protótipo e do modelo (Melo, 2015).

Tabela 2.1. Fatores de escala na modelagem centrífuga (Melo, 2015).

Grandeza	Fator de Escala
Gravidade	N
Comprimento	$1/N$
Densidade	1
Massa	$1/N^3$
Área	$1/N^2$
Tempo (T)	$1/N^2$
Tensão (σ)	1

2.6 Modelagem Física de Escorregamentos Submarinos

Há na bibliografia trabalhos envolvendo modelagem de escorregamentos submarinos, mas poucos em centrífugas geotécnicas. Estes trabalhos (Mohrig et al., 1998; Mohrig et al., 1999; Mohrig e Marr, 2003; Ilstad et al., 2004a) sugerem que o motivo principal para a mobilidade de grandes escorregamentos em taludes de inclinação suave é a hidroplanagem.

O primeiro trabalho sobre escorregamentos submarinos modelado em centrífuga geotécnica foi de Boylan et al. (2010), onde eles concluem preliminarmente diferenciando a distância entre escorregamentos submarinos e subaéreos, e que testes nas propriedades do solo podem fornecer informações sobre a história de movimentos deste solo.

Um trabalho recente feito em centrífuga geotécnica por Gue (2012) apresentou um estudo de escorregamentos submarinos, em que ensaios foram feitos em gravidades diferentes

para reavaliar as leis de escalas envolvidas num fluxo submarino. O talude foi instrumentado com células de poropressão, assim como câmeras para capturar imagens dos ensaios.

O mesmo autor conclui em seu estudo com uma lei de escalas para os fluxos submarinos diferente da lei de escala usual, considerando a distância do fluxo de detritos apresentando uma relação com o protótipo de N^3 vezes o valor no modelo, confirmado pela modelagem numérica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Centrífuga Geotécnica

A centrífuga geotécnica (Wyle Labs, EUA) da UENF é do modelo de cesto duplo. Possui carga útil de 1000 quilogramas, com uma velocidade máxima de 227 rotações por minuto, podendo gerar um campo gravitacional de até 100 vezes o valor da gravidade.

As principais características desta centrífuga geotécnica são apresentadas a seguir (Pardo, 2015):

- Cestas duplas com capacidade de 100g-ton cada uma;
- 3,5 metros de raio efetivo;
- Amostras com dimensões máximas 0,9 x 0,9 x 1,0 m (largura, comprimento, altura);
- Sistema de aquisição de dados (National Instruments) wireless;
- Entre outras.

3.2 Solo utilizado nos ensaios

Para a execução dos ensaios foi utilizado um solo composto por metacaulim (60%) e caulim (40%), variando o teor de umidade em função do valor do limite de liquidez (LL). Os percentuais e massas de cada componente se encontram na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Percentuais e massas dos componentes.

Ensaio nº	Metacaulim (kg)	Caulim (kg)	Água (kg)	Teor de umidade
--------------	--------------------	----------------	--------------	--------------------

1	5,4	3,6	5,06	56,2%
2	5,4	3,6	6,07	67,4%
3	5,4	3,6	7,59	84,3%
4	5,4	3,6	7,59	84,3%
5	5,4	3,6	7,59	84,3%
6	5,4	3,6	7,59	84,3%

De acordo com a análise dos ensaios preliminares realizados, foi mantido um valor de umidade na mistura, para assim observar o comportamento desta durante os escorregamentos em diferentes gravidades alteradas.

3.2.1 Ensaios de Limite de Consistência

Para realizar uma dosagem ideal da mistura de solo, foram realizados ensaios de limite de consistência de cada um dos componentes: o metacaulim (HP Ultra), de silicato de alumínio ($Al_2Si_2O_7$) e o caulim do tipo Coat 87 (Monte Pascoal). Os resultados dos ensaios dos limites de consistência são encontrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.2. Percentuais e massas dos componentes em cada ensaio. NP indica que o material é não plástico.

Material	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
Metacaulim	-	NP	NP
Caulim	66,6	34,6	32,0
Mistura	56,2	36,9	19,2

3.3 Aparelhagem

Para reproduzir um escorregamento submarino em laboratório, foi desenvolvida uma infraestrutura específica para a execução dos ensaios com os seguintes componentes:

- Rampa de acrílico com lixa P50 simulando o leito marinho, com orifícios para os transdutores, mostrada na caixa teste, com dimensões de 55x70x25 cm (alt, comp, larg), na Figura 3;
- Suportes para os LED's de alta potência;
- Câmera de alta velocidade HiVision (Fastec, EUA), e seu respectivo suporte;
- Atuador hidráulico para realizar a abertura da comporta;

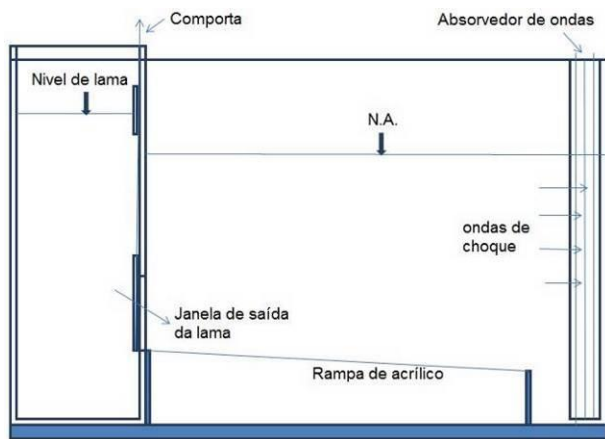


Figura 3: Esquema da caixa teste, contendo a rampa de acrílico, com inclinação de 5%.

- Suporte para o atuador;
- Transdutores de tensão total EPL, que mede tensões de até 500 kPa.
- Transdutores de poropressão EPB-PW que suportam pressões de até 6900 kPa.

3.4 Métodos Experimentais

3.4.1 Ensaios da Abertura da Comporta

A Figura 4 mostra como foi o esquema de colocação dos transdutores na rampa de acrílico, com o espaçamento entre eles.

Para a realização do ensaio, foi necessário o auxílio de um atuador hidráulico (Milwaukke Cilinder, EUA) com capacidade de pressão de 20684 kPa. Nestes ensaios, a câmera de alta velocidade realizou as filmagens dos escorregamentos. A estrutura da câmera é mostrada na Figura 5.

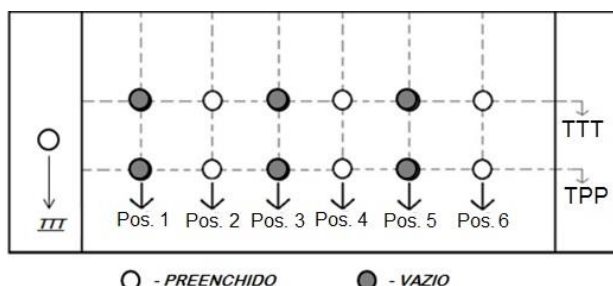


Figura 4: Esquema da vista superior da caixa teste, detalhando as posições dos transdutores de tensão total (TTT), e os de poropressão (TPP) na rampa de acrílico.

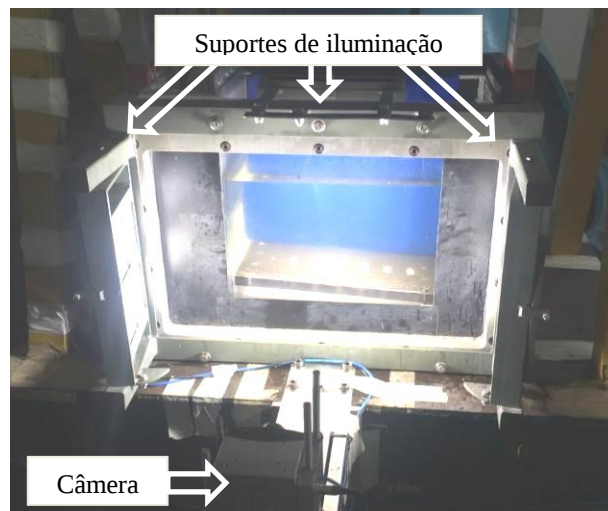
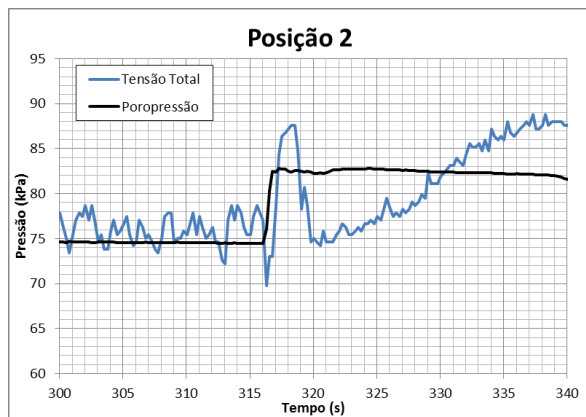


Figura 5: Vista frontal da caixa teste – iluminação ligada e suporte da câmera de alta velocidade.

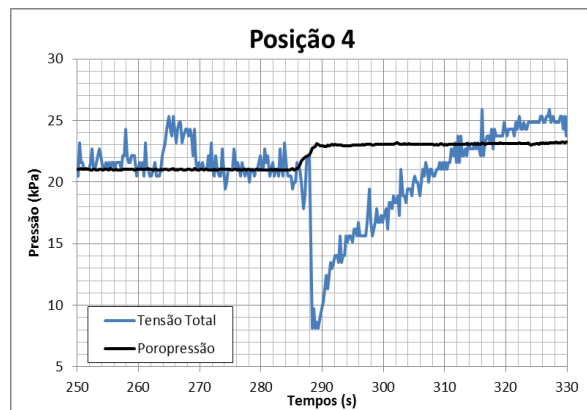
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios de Escorregamento

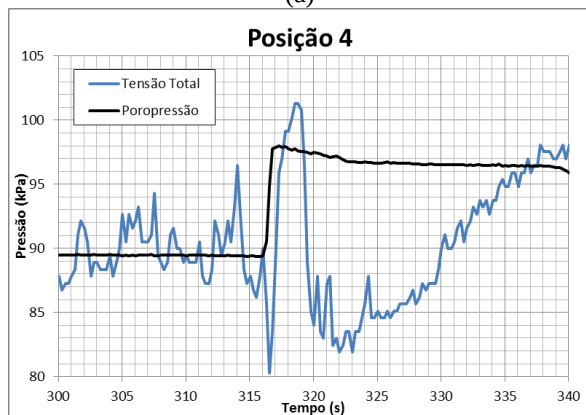
Após os ensaios de determinação da S_u , os ensaios de abertura de comporta foram realizados nas mesmas gravidades induzidas. Os gráficos de tempo x pressão (kPa) dos ensaios 3 e 6, realizados a 40g e 10g estão dispostos nas Figuras 6 e 7. Foram retirados dos gráficos os dados dos estágios de aceleração e desaceleração da centrífuga, por isso o tempo marcado nas figuras já está avançado para o ponto em que a gravidade já está estabilizada. Os picos de tensão, tanto positivos quanto negativos, nas posições 2 e 4 representam o momento de abertura da comporta, em que há ainda muita turbulência na saída dos detritos, seguido do acréscimo de tensão, indicando o depósito da lama acima dos transdutores. Nos ensaios, o solo teve seu teor de umidade constante em 84,3%, apenas com a diferença nas gravidades induzidas.



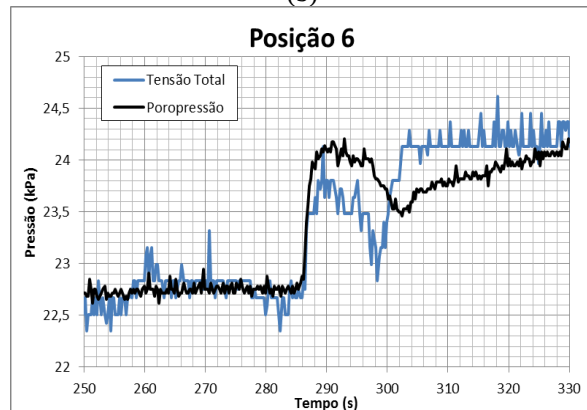
(a)



(b)



(b)



(c)

Figura 7: Resultados do ensaio 6, realizado a 10g com os valores dos transdutores de tensão total e poropressão em função do tempo nas posições 2 (a), 4 (b), e 6 (c) na rampa.

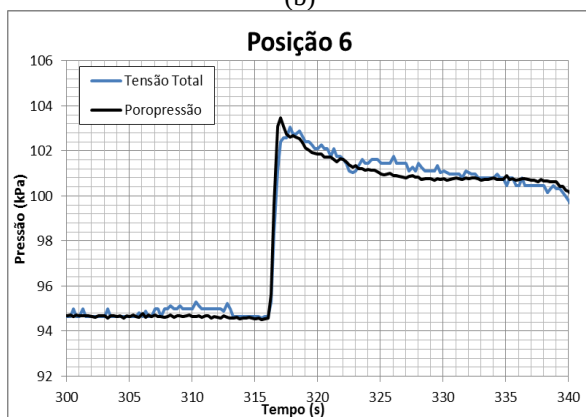
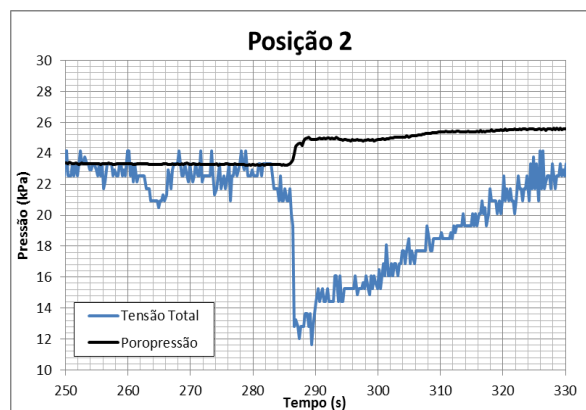


Figura 6: Resultados do ensaio 3, realizado a 40g com os valores dos transdutores de tensão total e poropressão em função do tempo nas posições 2 (a), 4 (b), e 6 (c) na rampa.



(a)

Para uma melhor comparação, destaca-se a posição 6 dos ensaios na Figura 8, em que no ensaio realizado a 40g (Figura 8a) as leituras dos transdutores se mantiveram no mesmo nível de tensões, indicando uma tensão efetiva nula, o que mostra a ocorrência da hidroplanagem. Na posição 6 do ensaio realizado a 10g (Figura 8b), as leituras sofrem variações, mais precisamente na faixa dos 305 segundos, onde a poropressão é menor que a tensão total, que indicam um fluido fracamente coesivo que não possui coesão suficiente para suportar a tensão cisalhante frontal, o que acaba concluindo que é o único ensaio que não apresenta indícios de hidroplanagem.

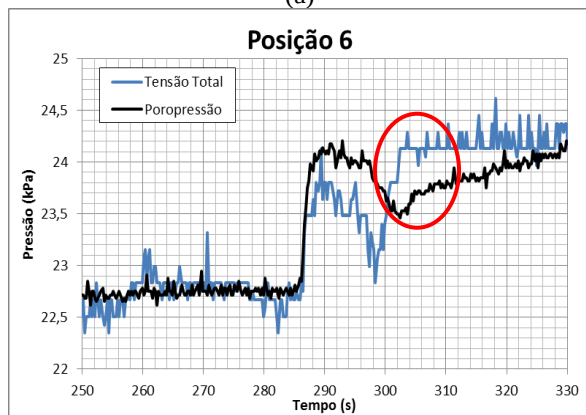
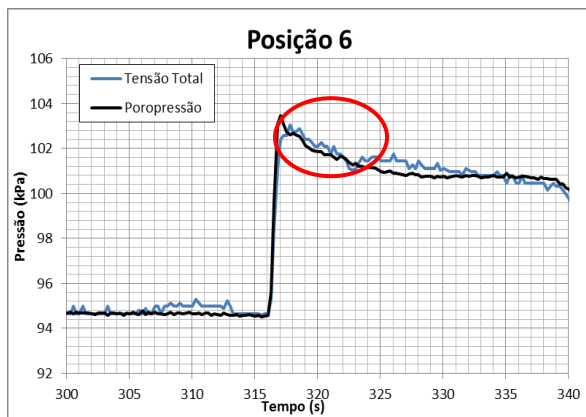


Figura 8: Posição 6 dos ensaios apresentados, com destaque na comparação entre os dados dos transdutores de tensão total e de poropressão.

4.2 Imagens da Câmera

As imagens dos ensaios estão nas Figuras 8 e 9 com fotografias capturadas ao longo de vários momentos que passam nas posições da rampa.

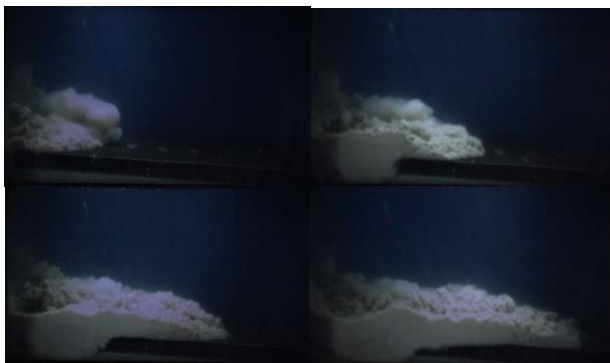


Figura 8: Imagens do ensaio 3, realizado a 40g.

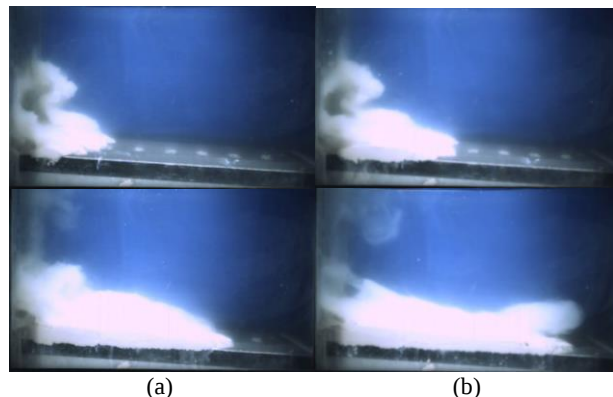


Figura 9: Imagens do ensaio 6, realizado a 10g.

Foi evidenciada a hidroplanagem no ensaio 3, mesmo que de forma discreta. Ilstad et al. (2004b) afirma que fluxos ricos em argila são caracterizados por uma forma bem definida da cabeça frontal. Apesar de bem rapidamente e discretamente, foi possível observar essa cabeça frontal no ensaio citado anteriormente.

O ensaio de número 6, por ser executado numa gravidade induzida menor, acaba ficando com o fluxo mais denso, e não foi observado nem uma corrente de turbidez acentuada, e nem a hidroplanagem, tanto que a corrida não alcançou o final da rampa.

4.3 Determinação da Hidroplanagem

4.3.1 Pressões de estagnação e tensão normal

Para executar os cálculos das pressões de estagnação e tensão normal, foi preciso determinar a velocidade frontal do escorregamento. A tabela 4.1 mostra os resultados dos cálculos. Com a velocidade frontal calculada, foi possível determinar as pressões de estagnação e normal, dispostas na Tabela 4.2.

Tabela 4.1. Cálculo da velocidade frontal.

Ensaio nº	Tempo _p (s)	Distância _p (m)	v _{fm} (m/s)	v _{fp} (m/s)
3	124,8	6400	1,28	51,28
6	74,8	50	0,066	0,66

Tabela 4.2. Cálculo das pressões de estagnação e normal.

Ensaio	h _a (m)	ρ _d (kg/m³)	p _f (kPa)	p _d (kPa)	Hidr. ?
3	0,8	1491,1	1314,9	3,833	Sim
6	0,22	1489,9	0,2234	1,053	Não

5 CONCLUSÕES

As principais características que devem aparecer em um escorregamento para que a hidroplanagem ocorra são o deslocamento da massa frontal, uma velocidade suficiente para separar a corrida do substrato de base, o valor das tensões efetivas serem próximas a zero.

Pelos cálculos das tensões de estagnação e normal, o ensaio 3 gerou a hidroplanagem, e no ensaio 6, não houve ocorrência do fenômeno. Isso se confirmou pelas imagens da câmera de alta velocidade.

Pelo comportamento dos gráficos gerados pela leitura dos transdutores de tensão total e de poropressão, foi possível observar que esse tipo de ensaio não possui resultados satisfatórios com gravidade induzida a 10g, pois não foi evidenciada a hidroplanagem devido à velocidade frontal alcançada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Estadual do Norte Fluminense e a Faperj, pelo fomento ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- BOYLAN, N. GAUDIN, C., WHITE, D.J., RANDOLPH, M.F. (2010). Modelling of submarine slides in the geotechnical centrifuge. *Physical Modelling in Geotechnics*; Londres, Inglaterra. p.1095-1100.
- GUE, S.S. (2012). Submarine Landslide Flows imulation Through Centrifuge Modelling, University of Cambridge, 266 pp.
- HARBITZ C.; PARKER G.; ELVERHOI A.; MARR J.; MOHRIG D.; HARFF A. (2003) Hidroplaning of subaqueous debris flows and glide blocks: Analitical solutions and discussion. *Journal of geophysical research*, vol 108.
- ILSTAD, T.; MARR, J. G.; ELVERHOI; HARBITZ B. (2004) a. On the Dynamics and Morphology of Submarine Debris Flows; University of Oslo.
- ILSTAD, T.; MARR, J. G.; ELVERHOI; HARBITZ B. (2004) b. Subaqueous debris flow behavior and its dependence on the sand/clay ratio: a laboratory study using particle tracking; University of Oslo.
- LOCAT, J.; LEE, H.J. (2000). Submarine landslides: Advances and Challenges, *Proceedings of the 8th*

International Symposium on Landslides, Cardiff, UK, pp. 193- 212.

- MELO, C. M. A. R. (2015). *Avaliação da Infuência da Geometria do Fuste na Capacidade de Carga das Estacas de Sucção por Modelos Centrifugados*. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos gos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil; 238 pp.
- MOHRIG, D., WHIPPLE, K.X., HONDZO, M., ELLIS, C., PARKER, G. (1998). Hydroplaning of subaqueous debris flow. *Geological Society of America Bulletin*, v.110, n.3, p.387-394.
- MOHRIG, D., ELVERHOI, A., PARKER, G. (1999). Experiments on the relative mobility of muddy subaqueous and subaerial debris flows and their capacity to remobilize antecedent deposits. *Marine Geology*, p.117-129.
- MOHRIG, D.; MARR, J. G. (2003). Constraining the efficiency of turbidity current generation from submarine debris flows and slides using laboratory experiments. *Marine and petroleum Geology*, p. 883-899
- PARDO, E. A. A. (2015). *Simulação de Instabilidade de Taludes Submarinos Usando Modelagem Centrifuga*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil; 82 pp.
- TAYLOR, R.N. (1995). *Geotechnical Centrifuge Technology*. In: B.A. Professional (Editor), Londres, Inglaterra; 301pp.