

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica

IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas

IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens

VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens

XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia

23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Modelagem Centrífuga da Interação Escorregamento Submarino- duto

Talytha Fonte Boa

Estudante de Doutorado, UFRJ, Campos dos Goytacazes, Brasil, tfonteboa@yahoo.com.br

Fernando Saboya

DSc., UENF, Campos dos Goytavazes, Brasil, saboya@uenf.br

Sérgio Tibana

DSc., UENF, Campos dos Goytavazes, Brasil, stibana@gmail.com

Rodrigo Martins Reis

DSc., UENF, Campos dos Goytavazes, Brasil, reis@uenf.br

RESUMO: Foram realizados ensaios em centrífuga geotécnica para investigar os mecanismos de impacto em dutos instalados no fundo do mar sujeitos a deslizamentos submarinos. O modelo é composto por uma rampa muito suave instrumentada com transdutores de poropressão e de tensão total estrategicamente posicionadas na rampa e um modelo de duto instrumentado. Uma câmera de alta velocidade foi acoplada ao modelo, o que permite a sincronização entre todas as leituras do instrumento à medida que o ensaio avança, e também para a análise de imagens e avaliação da velocidade dos detritos. O duto foi instrumentado com *strain gauges* e acelerômetros para registrar a aceleração resultante e as deformações no momento do impacto. Os resultados foram dados em termos de coeficiente de arrasto definido pelos dados registrados pela instrumentação levando, assim, a um melhor entendimento dos mecanismos de impacto. Os ensaios mostraram que a força de impacto não é fortemente dependente da taxa de embutimento, porém o coeficiente de arrasto é diretamente influenciado pelo diâmetro exposto do duto.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem centrífuga, escorregamento submarino, duto.

ABSTRACT: Tests in geotechnical centrifuges were carried out to investigate the impact mechanisms on pipelines installed in seabed subject to submarine landslides. The model comprises a very gentle ramp instrumented with pore pressure and total stress cells strategically placed on the ramp and an instrumented pipe model. A high-speed camera was attached to the model, which allows for synchronization between all instrument readings as the test progresses, and also for image analysis and the assessment of the debris velocity. The pipe was instrumented with strain gauges and accelerometers in order to record the resulting acceleration and the strains at the moment of impact. The results were given in terms of drag coefficient defined by the data recorded by the instrumentation leading, thus, to a better understanding of the impact mechanisms. The tests showed that the impact force is not strongly dependent on the embedment ratio, however the drag coefficient is directly influenced by the exposed diameter of the pipeline.

KEYWORDS: Centrifuge modelling, submarine landslide, pipe.

1 Introdução

Existem evidências da ocorrência de escorregamentos submarinos em uma ampla variedade de regiões *offshore*, desde águas rasas, zonas próximas às costas, taludes continentais, bem como fundos oceânicos em águas profundas (Hance, 2003). Esses eventos têm se tornado um dos principais riscos à integridade das estruturas assentes em leito marinho, causando prejuízos econômicos e ambientais. Os oleodutos, particularmente os troncos de exportação de hidrocarbonetos de áreas de produção para instalações de processamento em terra, são os mais expostos aos riscos de impacto de escorregamentos submarinos devido



ao seu comprimento extenso e condições de terreno variadas (Liu et al., 2015). Para quantificar esses riscos, é importante avaliar o impacto dos escorregamentos submarinos nas estruturas, para que alternativas de mitigação possam ser implementadas na fase de projeto.

O coeficiente de arrasto tem sido amplamente utilizado para quantificar a resistência ou dificuldade que a área exposta de um duto exerce sobre o movimento relativo do fluxo no impacto, uma vez que é um parâmetro adimensional que pode capturar a interação entre o fluido e um corpo sólido e é muito conhecido nos estudos de hidrodinâmica.

2 Revisão bibliográfica

A modelagem centrífuga é um método experimental eficaz no estudo do efeito de fluxos de detritos submarinos em dutos (Zakeri et al., 2012; Sahdi et al., 2014; Bryant et al., 2015; Oliveira et al., 2017; Yin et al., 2018), bem como a modelagem numérica do problema (Zakeri et al., 2009; Zakeri, 2009; Randolph et al., 2010; Randolph e White, 2012; Liu et al., 2015; Brum Jr., 2015). No Brasil, a modelagem de tais fenômenos tem sido foco de estudos recentes realizados com a centrífuga de viga da UENF (Motta, 2016; Acosta et al., 2017; Santos, 2018; Ferreira, 2020) e na centrífuga de tambor da Alberto Luiz Instituto de Pós-Graduação e Investigação em Engenharia de Coimbra (Pelissaro, 2018).

Em geral, os modelos utilizados para estudar problemas geotécnicos são mais bem representados por meio de modelagem física em centrífuga geotécnica, devido à equivalência do nível de tensão atuando no protótipo. No que diz respeito à modelagem de deslizamentos submarinos, isso é possível por meio de leis de escala (Taylor, 1994). Gue (2012) usou a modelagem centrífuga para conduzir um estudo de fluxos de deslizamentos submarinos, onde a aceleração da gravidade, N , foi variada para entender as leis de escala envolvidas nas distâncias de deslizamentos. O autor concluiu que a escala direta N normalmente aplicada ao comprimento não pode ser aplicada ao trajeto de deslizamento submarino, e ele descobriu que o fator de escala de N^3 pode representar adequadamente a condição do protótipo. A abordagem de Gue (2012) claramente precisa de mais ensaios para ser completamente aceita, mas demonstra que o dimensionamento do fluxo de lama ainda é uma demanda em aberto. Na Tabela 1, encontram-se as leis de escala utilizadas neste estudo.

Tabela 1. Leis de escala.

Parâmetro	Protótipo	Modelo
Gravidade	1	N
Comprimento	L	L/N
Distância do fluxo	L	L/N^3
Força	F	F/N^2
Tempo	T	T/N^2
Velocidade do fluxo	v	v/N

O fluxo de detritos submarinos pode mobilizar milhares de quilômetros cúbicos de volume de material e, com relação à distância do deslizamento, atingir centenas de quilômetros em taludes suavemente inclinados, com o deslizamento durando de minutos a vários dias (Hühnerbach e Masson, 2004; Bryn et al., 2005; Masson et al., 2006). Hance (2003) afirmou que a maioria dos deslizamentos submarinos observados e estudados ocorre em encostas muito suaves, a maioria delas com inclinações variando de 3 a 5 °.

3 Materiais e métodos

Os ensaios foram realizados na centrífuga geotécnica de viga da UENF a 40 x g. Este nível g foi escolhido com base na limitação das instalações (contêiner, rampa e distância entre pares de instrumentos), e por se apresentar numa escala muito adequada para representar o duto como elemento estrutural. O desenho do modelo foi apoiado por estudos recentes sobre deslizamentos submarinos realizados em centrífugas geotécnicas (Pardo, 2015; Motta, 2016). A caixa do modelo de ensaio tem 0,86 m de comprimento, 0,63 m de largura e 0,56 m de altura. No interior do contêiner, o modelo é composto por um compartimento que



retém a lama, uma rampa de acrílico com inclinação de 3° , um duto de alumínio e um sistema que absorve a energia das ondas que são geradas com o deslizamento. A centrífuga e a caixa de ensaio podem ser vistas na Figura 1.

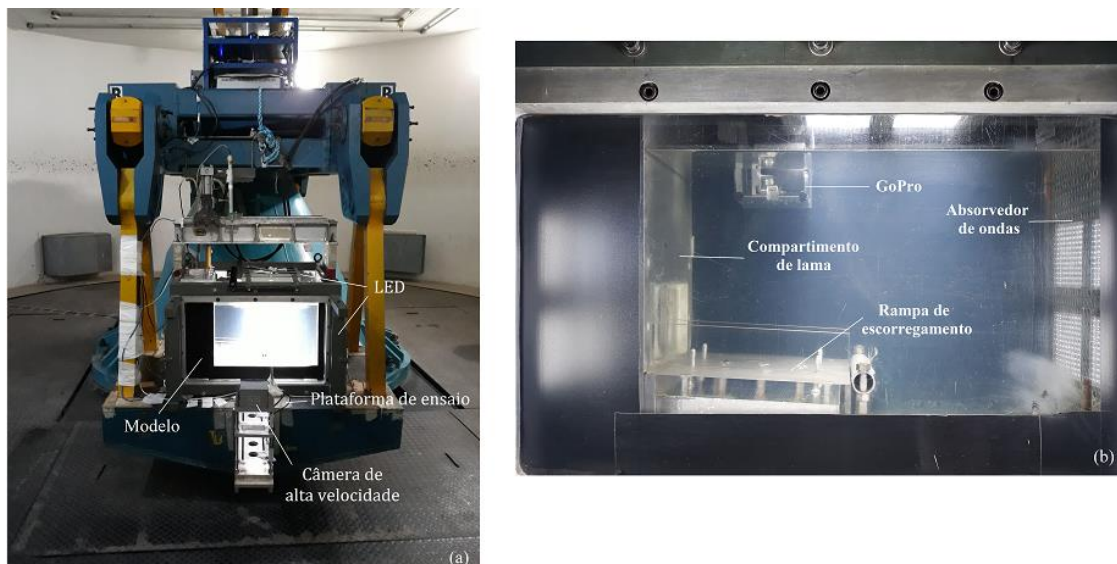


Figura 1. (a) Centrífuga geotécnica de viga e (b) caixa do modelo de ensaio.

O modelo do duto em alumínio, mostrado na Figura 2, tem 0,2477 m de comprimento, 0,0255 m de diâmetro e $1,9 \times 10^{-3}$ m de espessura para simular as dimensões reais de um oleoduto de petróleo e gás. O duto, em termos de suporte, foi bi-engastado, com alto nível de restrição que, segundo Oliveira *et al.* (2017), resulta em maiores forças no impacto.

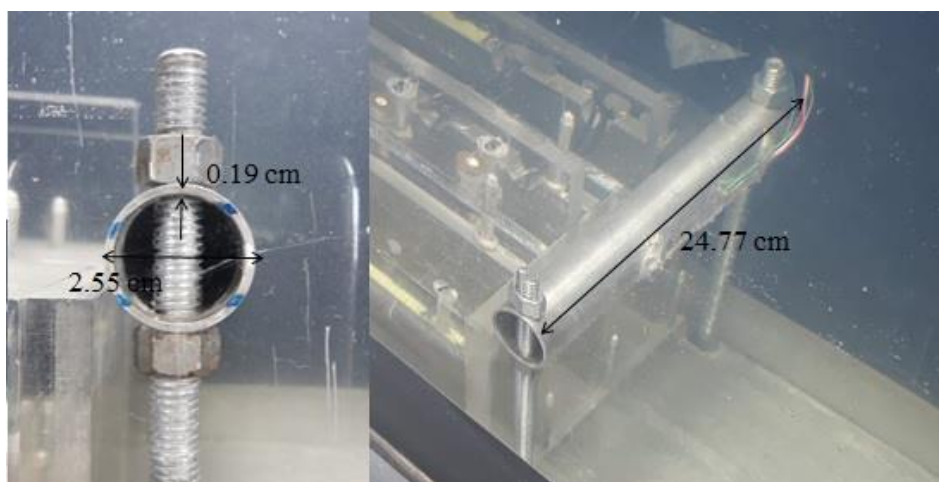


Figura 2. Dimensões do duto usado nos ensaios.

A lama utilizada nos ensaios foi composta por uma mistura de 40% de caulim e 60% de metacaulim, colocada com teor de umidade de 1,5 vezes o limite de liquidez. Este teor de umidade foi baseado em ensaios de centrífuga realizados por Acosta (2017), que relatou ser o limite para atingir a aquaplanagem. A caracterização da mistura rendeu um limite de liquidez $LL = 54,3\%$ (o que caracteriza um teor de umidade de 81,45% para a mistura), um limite de plasticidade $LP = 32,1\%$, um índice de plasticidade $IP = 22,2\%$ e a densidade real dos grãos $G_s = 2,47$. Com relação à reologia da mistura, um ensaio de viscosidade foi realizado com um reômetro Brookfield DV3T em temperatura ambiente, e resultou em 3 Pa.s.

O modelo compreende a seguinte instrumentação: um transdutor de tensão total no fundo do



compartimento de lama para analisar o volume de lama liberado durante o ensaio; três pares de transdutores de tensão total e poropressão dispostos na parte inferior da rampa de deslizamento, com o objetivo de verificar as características dele; um *strain gauge* e um acelerômetro no duto para verificar o momento do impacto e a deformação resultante; uma câmera comercial, para registrar a vista superior do deslizamento e; uma câmera de alta velocidade com um conjunto de lâmpadas LED, que foi sincronizada com a instrumentação, permitindo a análise da morfologia do fluxo de detritos e o cálculo de sua velocidade frontal. Todos os instrumentos instalados na via de fluxo foram calibrados em voo. A aquisição de dados foi realizada a 3 MHz. A instrumentação no duto foi calibrada na interface por meio de dispositivo especial, aplicando cargas de compressão no suporte de peso, no mesmo eixo que recebe a força de impacto do escorregamento, e medindo a deformação no extensômetro. Na Figura 3 é possível visualizar o projeto do modelo de ensaio.

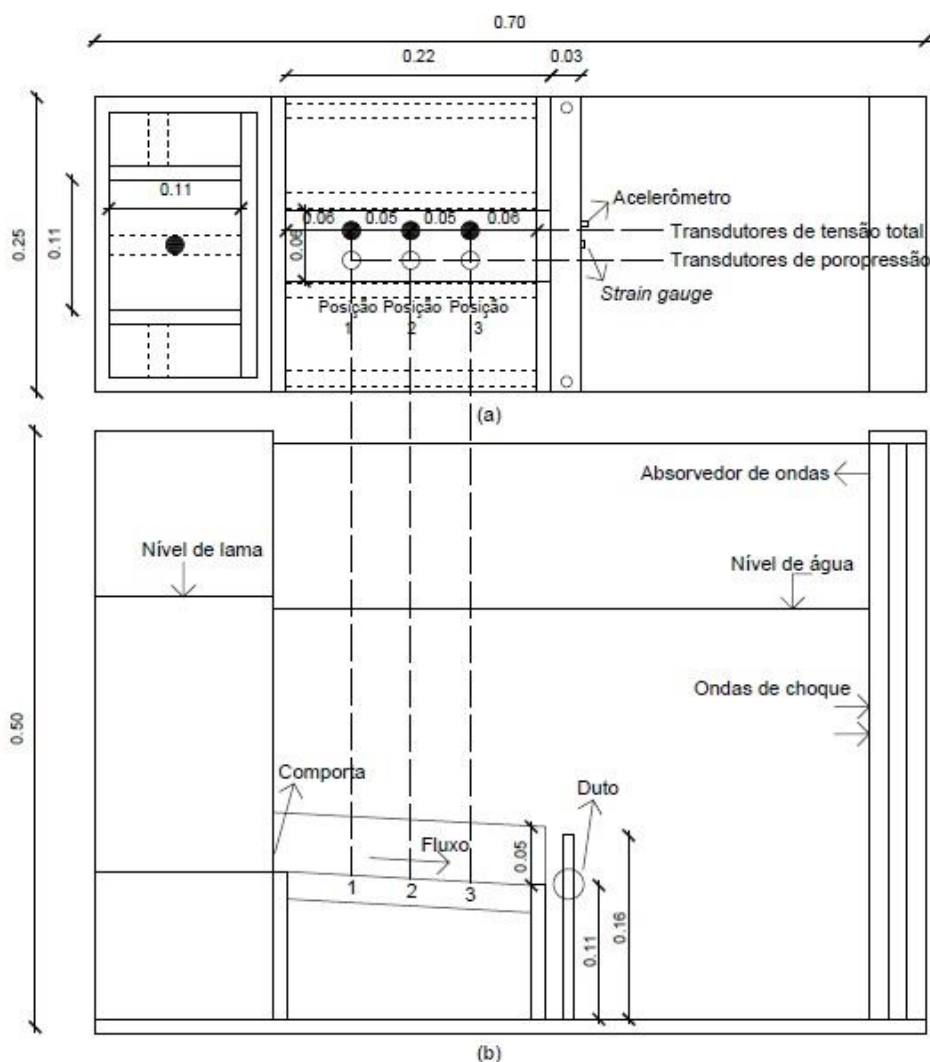


Figura 3. Projeto do modelo de ensaio: (a) vista superior e (b) seção transversal.

Com relação à análise dimensional do modelo, com base na definição de inércia, o coeficiente de arrasto C_D é definido pela Eq. 1 e representam um parâmetro adimensional importante para estudar o fluxo em torno de um obstáculo.

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho v^2 A_p} \quad (1)$$



Onde F é a força de impacto, ρ é a densidade da lama, v é a velocidade frontal da massa e A_p é a área frontal, que no caso de cilindros de comprimento l e diâmetro d , com eixo perpendicular à direção de velocidade v , é definido como $A_p = ld$.

4 Programa de ensaios na centrífuga

O programa experimental foi realizado por meio de uma série de ensaios de centrífuga variando a razão de exposição do diâmetro do tubo em relação ao leito marinho, partindo de 100% exposto (razão de embutimento 0%) a 25% exposto (razão de embutimento 75%).

O procedimento de ensaio seguiu as seguintes etapas:

- A instrumentação relativa foi posicionada no duto, no fundo do compartimento de lama e na rampa de escorregamento e seu funcionamento foi verificado através do sistema de aquisição de dados; foi adicionado o contador de peso, bem como a viga de suporte, atuador hidráulico, iluminação LED e câmeras comerciais e de alta velocidade;
- O duto foi posicionado na altura desejada para o ensaio;
- Água foi adicionada à caixa de ensaio;
- Os materiais para a mistura de lama foram pesados e homogeneizados por 30 minutos;
- A mistura de lama foi despejada no compartimento de lama;
- A centrífuga voou a 109 RPM, que apresenta uma aceleração de 40 x g;
- Após a centrífuga estabilizar na aceleração desejada para o ensaio, a comporta foi aberta por um atuador hidráulico a uma velocidade de 30 mm/s, iniciando o deslizamento;
- A centrífuga foi desacelerada;
- Por fim, as medições de lama foram realizadas no compartimento de lama e ao longo da rampa de deslizamento para verificar o volume de lama que escoou e a altura média do fluxo.

5 Resultados

A Figura 4 mostra duas imagens para o Ensaio C, obtidas do vídeo da câmera de alta velocidade, a primeira referente ao meio do escorregador e a segunda ao momento do impacto no duto. Os outros ensaios apresentaram resultados semelhantes.



(a)

(b)

Figura 4. Imagens da câmera de alta velocidade (a) no meio do escorregamento e (b) na hora do impacto no duto.

O volume total de lama, V_{tl} , a densidade de lama, ρ_d , o tempo de deslizamento, Δt , a velocidade frontal do modelo, v_{fm} e a velocidade frontal do protótipo, v_{fp} , para cada teste são apresentados na Tabela 2.

Os dados do *strain gauge* e do acelerômetro mostrados na Figura 5, fornecem o tempo exato do impacto do fluxo de lama no duto e a deformação por ele sofrida, de acordo com a medição dos picos das curvas. Por meio da calibração, foi possível estimar a força no modelo de duto, F_m , e, por meio das leis de escala (Tabela 1), a força no protótipo, F_p , de acordo com o diâmetro exposto, d_{exp} . Em termos de parâmetro



adimensional, o coeficiente de arrasto foi calculado usando o diâmetro exposto de acordo com a Eq. 1. Os dados são fornecidos na Tabela 3.

Observou-se que as forças de impacto apresentam pouca variação em magnitude. Nesse caso, foi considerada a variação do coeficiente de arrasto C_D em relação ao diâmetro exposto do duto, utilizando como referência o duto 100% exposto (Figura 6).

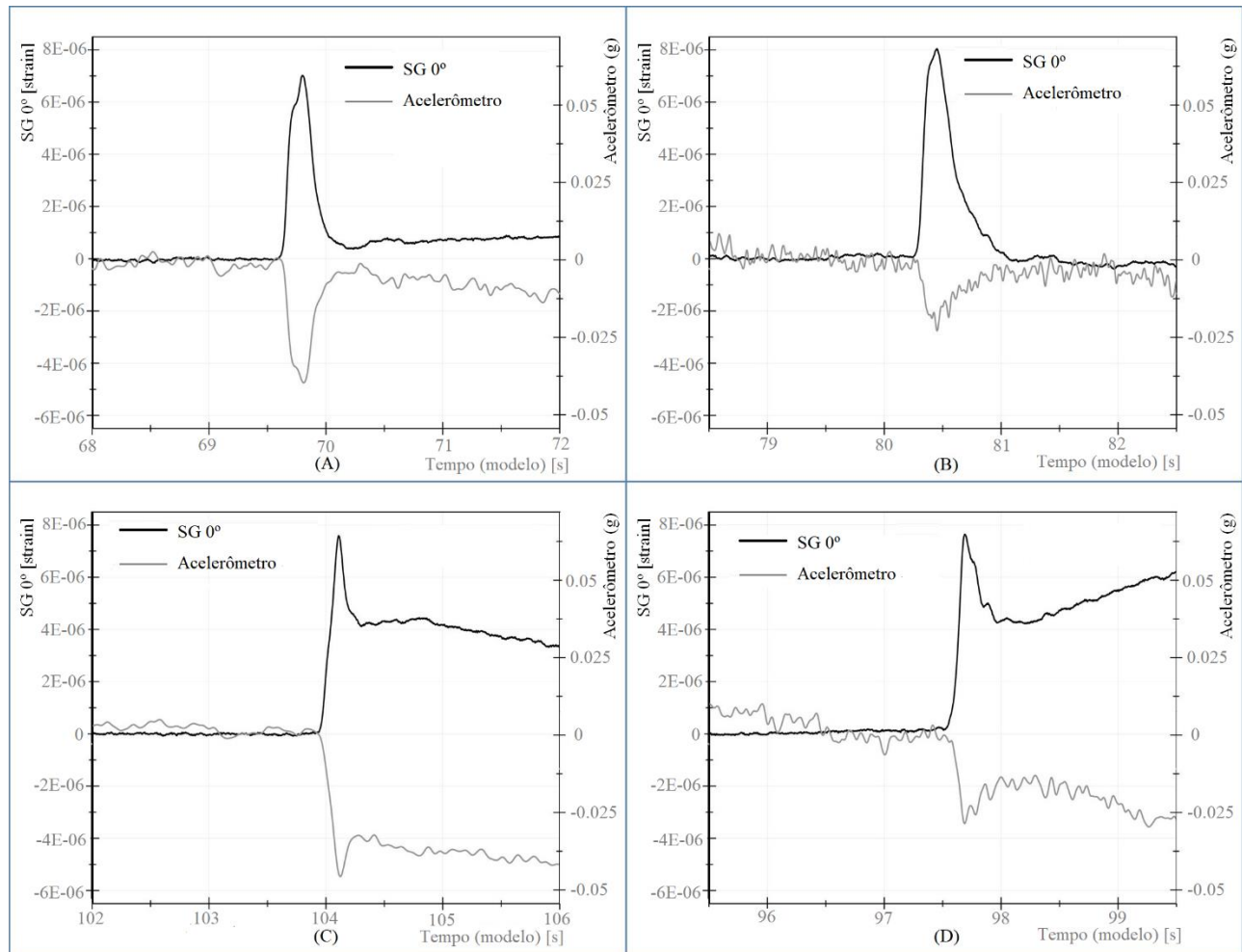


Figura 5. Strain gauge versus tempo versus acelerômetro: (a) ensaio A, (b) ensaio B, (c) ensaio C and (d) ensaio D.

Tabela 2. Dados da lama, tempo e velocidade de escorregamento dos ensaios.

Ensaio	Exposição do duto	V_{tl} (m ³)	ρ_d (g/cm ³)	Δ_t (s)	v_{fm} (m/s)	v_{fp} (m/s)
A	100%	0.0029	1.45	0.197	1.14	45.54
B	75%	0.0030	1.47	0.221	1.01	40.60
C	50%	0.0029	1.50	0.196	1.14	45.80
D	25%	0.0030	1.40	0.210	1.07	42.72

Table 3. Dados do impacto no duto e coeficiente de arrasto.

Ensaio	Exposição do duto	d_{exp} (m)	F_m (N)	F_p (kN)	C_D
A	100%	0.0255	7.42	11.87	1,248558
B	75%	0.0191	8.44	13.50	2,351002
C	50%	0.0127	7.99	12.78	2,569686
D	25%	0.0063	8.04	12.87	6,388162

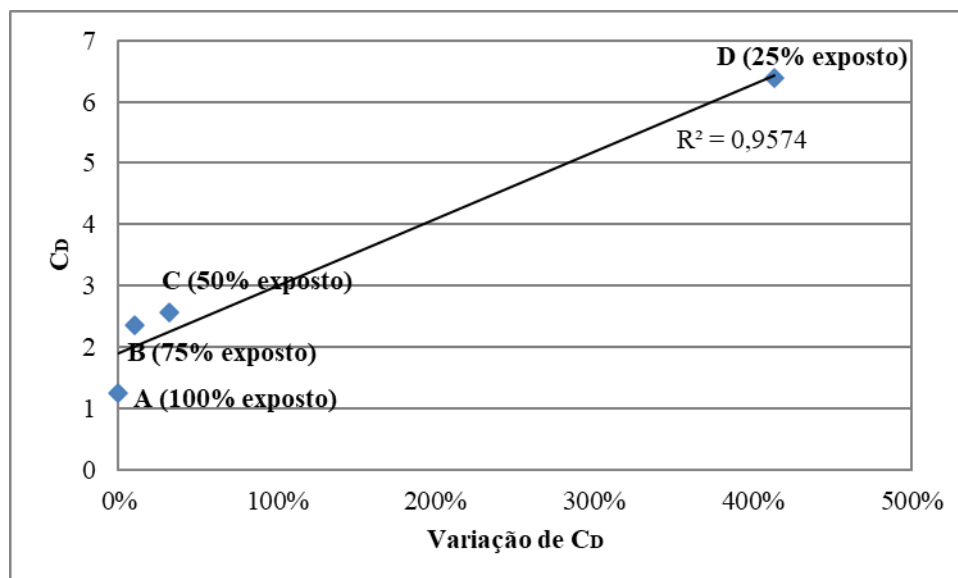


Figura 6. Coeficiente de arrasto versus variação do coeficiente de arrasto em relação ao diâmetro exposto.

6 Conclusões

Este estudo apresenta os resultados de ensaios de modelagem física realizados em uma centrífuga geotécnica para investigar os mecanismos dos fluxos de detritos submarinos que atingem um duto embutido em diferentes proporções em relação ao leito marinho. A lama utilizada consistiu na mistura de caulim com metacaulim. A instrumentação permitiu a aquisição das deformações sofridas pelo duto, bem como as características do escoamento em seu canal deslizante.

Observou-se que a força exercida no duto pelo escorregamento apresentou pouca variação em relação à taxa de exposição do duto, sendo inferior a 14%. Esse resultado pode ser explicado pelas aproximações e simplificações experimentais, como o posicionamento da instrumentação em relação ao ângulo de ataque do escorregamento. Por outro lado, ao se considerar o coeficiente de arrasto, observou-se uma correlação linear com sua variação nos ensaios. Para o duto 100% exposto a 25% exposto, foi observado um aumento de 414% no coeficiente de arrasto. Este resultado é relevante na fase de projeto dos dutos, uma vez que a força de arrasto é uma força solicitante sobre a estrutura a ser dimensionada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobras pelo apoio financeiro a este projeto de pesquisa. O trabalho descrito neste artigo faz parte de um Termo de Cooperação firmado entre a Petrobras e a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), para o desenvolvimento do projeto de pesquisa intitulado "Modelagem Centrífuga do Comportamento de Dutos sob Carga Lateral de Deslizamentos Submarinos" (Contratual Instrumento 5850.0102424.16.9).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA, E. A.; TIBANA, S.; ALMEIDA, M. S. S.; SABOYA JR., F. S. Centrifuge modeling of hydroplaning in submarine slopes. *Ocean Engineering*, v. 129, p. 451-458, 2017.
- BRUM JR., S. A. *Desenvolvimento de simulações numéricas de fluxos gravitacionais através de elementos discretos acoplados à dinâmica de fluidos computacional*. Tese de doutorado - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes - RJ, 2015.
- BRYANT, S. K.; TAKE, W. A.; BOWMAN, E. T.; MILLEN, M. D. L. Physical and numerical modelling of dry granular flows under Coriolis conditions. *Géotechnique*, v. 65 (3), p. 188- 200, 2015.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- BRYN, P.; BERG, K.; FORSBERG, C. F.; SOLHEIM, A.; KVALSTAD, T. J. Explaining the Storegga slide. *Marine and Petroleum Geology*, v. 22, p. 11-19, 2005.
- FERREIRA, J. M. A. *Análise do impacto de deslizamentos submarinos em dutos por meio de modelagem centrífuga*. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes - RJ, 2020.
- GUE, S. S. *Submarine landslide flows simulation through centrifuge modelling*. PhD thesis - University of Cambridge - UK, 2012.
- HANCE, J. J. *Development of a database and assessment of seafloor slope stability based on published literature*. MSc thesis - University of Texas, Austin, 2003.
- HÜHNERBACH, V.; MASSON, D. G. Landslides in the North Atlantic and its adjacent seas: analysis of their morphology, setting and behaviour. *Marine Geology*, v. 213 (1-4), p. 343- 362, 2004.
- LIU, J.; TIAN, J.; YI, P. Impact forces of submarine landslides on offshore pipeline. *Ocean Engineering*, v. 95, p. 116-127, 2015.
- MASSON, D. G.; HARBITZ, C. B.; WYNN, R. B.; PEDERSEN, G.; LØVHOLT, F. Submarine landslide: process, triggers and hazard prediction. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, v. 364 (1845), p. 2009-2039, 2006.
- MOTTA, G. S. *Modelagem física de deslizamentos submarinos em diferentes níveis de aceleração gravitacional*. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes - RJ, 2016.
- OLIVEIRA, J. R. M. S.; RAMMAH, K. I.; TREJO, P. C.; ALMEIDA, M. S. S.; ALMEIDA, M. C. F. Modelling of a pipeline subjected to soil mass movements. *Internacional Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, v. 17 (4), p. 246-256, 2017.
- PARDO, E. A. *Simulação de instabilidades de talude de submarino usando modelagem centrífuga*. Tese de doutorado - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro - RJ, p. 75, 2015.
- PELISSARO, D. T. *Modelagem centrífuga de fluxo de detritos submarinos*. Dissertação de mestrado - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro - RJ, 2018.
- RANDOLPH, M. F.; SEO, D.; WHITE, D. J. Parametric solutions for slide impact on pipelines. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 136 (7), p. 940-949, 2010.
- RANDOLPH, M. F.; WHITE, D. J. Interaction forces between pipelines and submarine slides - A geotechnical viewpoint. *Ocean Engineering*, v. 48, p. 32-37, 2012.
- SAHDI, F.; GAUDIN, C.; WHITE, D. J.; BOYLAN, N.; RANDOLPH, M. F. Centrifuge modelling of active slide-pipeline loading in soft clay. *Géotechnique*, v. 64 (1), p. 16-27, 2014.
- SANTOS, T. M. F. B. *Modelagem centrífuga de duto sujeito a impacto de escorregamento submarino*. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes - RJ, 2018.
- TAYLOR, R. N. *Geotechnical centrifuge technology*. London: CRC Press, 1994, 296 p.
- YIN, M.; RUI, Y.; XUE, Y. Centrifuge study on the runout distance of submarine debris flows. *Marine Georesources & Geotechnology*, p. 1-11, 2018.
- ZAKERI, A. Submarine debris flow impact on suspended (free-span) pipelines: normal and longitudinal drag forces. *Ocean Engineering*, v. 36, p. 189-499, 2009.
- ZAKERI, A.; HØEG, K.; NADIM, F. Submarine debris flow impact on pipelines - Part II: numerical analysis. *Coastal Engineering*, v. 56 (1), p. 1-10, 2009.
- ZAKERI, A.; HAWLADER, B.; CHI, K. Drag forces caused by submarine glide block or out-runner block impact on suspended (free-span) pipelines. *Ocean Engineering*, v. 47, p. 50- 57, 2012.