

**ESTUDO DO EFEITO ESCALA NA MODELAGEM FÍSICA DE  
ESCORREGAMENTOS SUBMARINOS EM CENTRÍFUGA  
GEOTÉCNICA**

**DANIELLE SILVA LOPES DE ANDRADE**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**

**SETEMBRO - 2023**

**ESTUDO DE EFEITO ESCALA NA MODELAGEM FÍSICA DE  
ESCORREGAMENTOS SUBMARINOS EM CENTRÍFUGA  
GEOTÉCNICA**

**DANIELLE SILVA LOPES DE ANDRADE**

Dissertação apresentada ao Centro de  
Ciência e Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense (UENF),  
como parte das exigências para a  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Fernando Saboya Junior

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

SETEMBRO - 2023


# ESTUDO DE EFEITO ESCALA NA MODELAGEM FÍSICA DE ESCORREGAMENTOS SUBMARINOS EM CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA

**DANIELLE SILVA LOPES DE ANDRADE**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.


Aprovado em 03 de setembro de 2023.

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **JOSE TAVARES ARARUNA JUNIOR**  
Data: 24/04/2024 11:50:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. José Tavares Araruna Júnior (PhD. Geotecnia) – PUC/RIO

Documento assinado digitalmente  
 **SERGIO TIBANA**  
Data: 24/04/2024 14:37:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Sergio Tibana (D.Sc. Geotecnia) - LECIV/UENF

Documento assinado digitalmente  
 **ALDO DURAND FARFAN**  
Data: 24/04/2024 15:43:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Aldo Duran Farfán (D.Sc. Geotecnia) – LECIV/UENF

Documento assinado digitalmente  
 **FERNANDO SABOYA ALBUQUERQUE JUNIOR**  
Data: 24/04/2024 17:55:30-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Junior (D.Sc. Geotecnia) - LECIV/UENF  
(Orientador)

*“Por que Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas”*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me permitir chegar até aqui, por não me deixar desistir, por tornar possível concretizar um objetivo traçado ainda na graduação.

Aos meus pais Marta e Valmir por sempre me incentivarem, por serem meus guias e exemplos de que a educação pode mudar histórias.

Aos meus filhos Isaac, Sophia e Yasmin por suportarem todas as vezes em que tive de ser ausente e por me dar tanto amor.

Aos meus familiares que sempre foram meu suporte, em especial aos meus irmãos Mônica e Ayrton por sempre me incentivar.

Aos meus amigos Dayana Nogueira, Douglas Prado, Renan Barbosa e Jheyce de Souza por todas as palavras de incentivo, por todas as orações e por todas as palavras de carinho, eternamente grata por ter pessoas como vocês em minha vida.

Aos meus mestres Profº. Dsc. Niander Cerqueira Aguiar e Profº. Dsc. Fernando Saboya, pela paciência, pelos ensinamentos, pelas horas dedicadas a mim, obrigada pela oportunidade de adquirir conhecimento.

## RESUMO

Pesquisas que caracterizam os escorregamentos submarinos e suas consequências em estruturas *offshore* têm sido tema de diversos estudos ao longo dos anos. Devido à magnitude desses eventos e à complexidade dos mecanismos envolvidos, ainda há necessidade de esclarecimentos sobre a representatividade das variáveis envolvidas, especialmente as leis de escalas utilizadas atualmente para definir a velocidade alcançada durante os deslizamentos.

Alguns pesquisadores consideram a velocidade, tanto para o modelo quanto para o protótipo, como sendo independente da escala. Assim, a velocidade utilizada no modelo corresponderia à mesma velocidade encontrada no protótipo, o que influencia diretamente na taxa de cisalhamento durante o impacto do escorregamento em estruturas assentes no leito marinho.

Devido à escassez de abordagens sobre o tema em outras literaturas, um programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de estudar os efeitos de escala envolvidos em fenômenos de escorregamentos submarinos e suas consequências. Isso foi realizado por meio de ensaios em centrífuga geotécnica, variando a aceleração da gravidade para verificação do comportamento do solo e um possível estabelecimento de uma lei de escala mais representativa.

Considerando que solos de leito marinho apresenta comportamento de um fluido e, portanto, segue as leis relacionadas ao estado crítico de tensões, ficou-se evidente que, ao induzir o fluxo a diferentes acelerações de gravidades, variáveis como velocidade de escoamento, vazão, tensão total e velocidade média sofrem influência direta da aceleração da gravidade. Dessa forma correlação proposta por Gue (2012) para uma nova escala para a variável velocidade pode estar correta.

**Palavras-chave:** escorregamentos submarinos; velocidade; escala; modelagem centrífuga; ensaios de laboratório.

## ABSTRACT

Research that characterizes submarine landslides and their consequences on offshore structures has been the subject of several studies over the years. Due to the magnitude of these events and the complexity of the mechanisms involved, there is still a need for clarification on the representativeness of the variables involved, especially the scale laws currently used to define the velocity reached during landslides.

Some researchers consider the velocity for both the model and the prototype to be scale-independent. Thus, the velocity used in the model would correspond to the same velocity found in the model, which directly influences the shear rate during the impact of the landslide on structures based on the seabed.

Due to the scarcity of approaches on the subject in other literatures, an experimental program was developed with the objective of studying the scale effects involved in submarine landslide phenomena and their consequences. This was done by means of tests in a geotechnical centrifuge, varying the acceleration of gravity to verify the behavior of the soil and a possible establishment of more representative scale law.

Considering that seabed soils behaves like a fluid and, therefore, follow the laws related to the critical state of stress, it was evident that, by inducing the flow to accelerations of gravity, variables such as flow velocity, flow rate, total tension and average velocity are directly influenced by the acceleration of gravity. Thus, the correlation proposed by Gue (2012) for a new scale for the velocity variable may be correct.

**Keywords:** submarines landslides; speed; scale; centrifugal modeling; laboratory tests.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção esquemática de talude submarino .....	33
Figura 2 - Tipos de escorregamentos submarinos .....	34
Figura 3 - Transições dos deslizamentos submarinos .....	35
Figura 4 - Diagrama do corpo de uma corrente de turbidez .....	36
Figura 5 - Formas de instabilidade das correntes de turbidez: (a) Vórtices de Kelvin-Helmholtz e (b) Complexo de lobos e ranhuras .....	36
Figura 6 - Velocidade ao longo do tempo em diferentes posições para fluxos submarinos .....	37
Figura 7 - Causas dos escorregamentos submarinos .....	40
Figura 8 - Pressão do fluido e pressão do fluxo gerados na parte frontal deslizante	41
Figura 9 - Esquematização do comportamento da tensão total e poropressão.....	44
Figura 10 - (a) Curva tensão-deformação para um fluido Newtoniano e (b) Curva tensão-deformação para um fluido não-Newtoniano.....	45
Figura 11 - Comportamento reológico dos diferentes fluidos .....	47
Figura 12 - Detalhe da base cilíndrica do penetrômetro.....	50
Figura 13 - Componente de tensões que agem sobre o T-bar.....	51
Figura 14 - Fatores que afetam a resistência do T-bar .....	52
Figura 15 - Resistência resultante qT-bar .....	52
Figura 16 - Correspondência entre tensão inercial em um modelo e a tensão gravitacional no protótipo .....	53
Figura 17 - Curva granulométrica da mistura de 60% de metacaulim e 40% de caulim .....	61
Figura 18 - Preparação da lama utilizada nos ensaios.....	62
Figura 19 - Centrífuga de viga da UENF com o container do ensaio à esquerda e container de contrabalanceamento à direita .....	62
Figura 20 - Central de controle da centrífuga.....	63
Figura 21 - Dimensões do container utilizado nos ensaios, (a) Vista superior e (b) Vista frontal .....	64
Figura 22 - Detalhamento do duto.....	65
Figura 23 - (a) Calibração da haste A, (b) Calibração da haste B e (c) Calibração do duto .....	66
Figura 24 - Posicionamento das hastes e do duto no container.....	66



Figura 25 - Configuração geral do ensaio .....	67
Figura 26 - Equipamentos utilizados nos ensaios .....	68
Figura 27 - Posição dos sensores de tensão total e poropressão na rampa e representação esquemática da rampa de acrílico .....	70
Figura 28 - Disposição do <i>strain gauge</i> no duto .....	70
Figura 29 - Esquema do posicionamento dos instrumentos .....	71
Figura 30 - Comparação das forças de impacto para os ensaios de 15g, 35g e 45g .....	78
Figura 31 - Imagens dos ensaios de 15g .....	83
Figura 32 - Imagens ensaio 35g .....	86
Figura 33 - Imagens ensaio 45g .....	86
Figura 34 - Acréscimo de tensão nos ensaios de 15g, 35g e 45g .....	93

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Fatores que influenciam na ruptura de taludes submarinos.....	39
Tabela 2 - Principais leis de escala .....	56
Tabela 3 - Correlações para possíveis novas leis de escala.....	58
Tabela 4 - Rotações gravitacionais dos ensaios .....	66
Tabela 5 - Sensores utilizados no ensaio.....	69
Tabela 6 - Forças de impacto.....	77
Tabela 7 - Pressão de estagnação.....	79
Tabela 8 - Pressão de estagnação, tensão normal e número densimétrico de Froude .....	80
Tabela 9 - Número de Reynolds e Coeficiente de Arrasto .....	81
Tabela 10 - Velocidade média no trecho TT2/PP2 e TT3/PP3.....	89
Tabela 11 - Velocidade média no trecho TT3/PP3 e Duto .....	91
Tabela 12 - Velocidade média deslocamento total do fluxo durante o ensaio.....	92

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resistência não drenada, ensaio 15g.....	73
Gráfico 2 - Resistência não drenada, ensaio 35g.....	73
Gráfico 3 - Resistência não drenada, ensaio 45g.....	74
Gráfico 4 - Tensões totais na caixa de teste 1 .....	75
Gráfico 5 - Vazão de escoamento da lama .....	76
Gráfico 6 - Vazão de escoamento da lama .....	76
Gráfico 7 - (a) Sensores de TT1/PP1, (b) Sensores TT2/PP2, (c) Sensores TT3/PP3 dos ensaios a 15g .....	82
Gráfico 8 - (a) Sensores de TT1/PP1, (b) Sensores TT3/PP3 dos ensaios a 35g.....	84
Gráfico 9 - (a) Sensores de TT1/PP1, Gráfico 7: (b) Sensores TT2/PP2, (c) Sensores TT3/PP3 dos ensaios a 45g .....	85
Gráfico 10 - Tensões efetivas no ensaio a 15g .....	87
Gráfico 11 - Tensões efetivas no ensaio a 35g .....	87
Gráfico 12 - Tensões efetivas no ensaio a 45g .....	88
Gráfico 13 - Velocidade média no modelo para os ensaios de 15g, 35g e 45g.....	90
Gráfico 14 - Velocidade média no protótipo para os ensaios de 15g, 35g e 45g .....	90
Gráfico 15 - Velocidade média no modelo para os ensaios de 15g, 35g e 45g.....	91
Gráfico 16 - velocidade média no protótipo para os ensaios de 15g, 35g e 45g.....	91
Gráfico 17 - Velocidade média no modelo para os ensaios de 15g, 35g e 45g.....	92
Gráfico 18 - velocidade média no protótipo para os ensaios de 15g, 35g e 45g.....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<i>PIV</i>	Particle Image Velocimetry
$p_f$	Pressão de estagnação do fluido
$\rho_w$	Densidade de massa de água
$v_f$	Velocidade frontal da massa deslizante
$p_d$	Tensão normal equivalente
$\rho_d$	Densidade do solo
$g$	Aceleração da gravidade
$h_a$	Espessura média do deslizamento
$\beta$	Ângulo de inclinação do talude
$F_{rd}$	Número densimétrico de Froude
$\rho$	Densidade de um dos fluidos
$\Delta\rho$	Diferença de densidade entre os dois fluidos
$l$	Distância percorrida
$\tau$	Tensão cisalhante
$\tau_c$	Tensão de cisalhamento crítica ou tensão de escoamento
$k$	Coeficiente de consistência relacionado com a viscosidade
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação
$n$	Índice de fluxo
$V$	Velocidade do fluido
$P$	Massa específica
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$F$	Força
$L$	Comprimento do corpo submerso
$C_d$	Coeficiente de arrasto
$Re$	Número de Reynolds
$A_p$	Área frontal do corpo submerso
<i>CFD</i>	Dinâmica dos fluidos computacionais
$R$	Raio
$W$	Velocidade de rotação
$S_u$	Resistência não drenada
$F$	Força atuante no penetrômetro

$N_T$	Fator de capacidade de carga
$A$	Área longitudinal do cilindro
$V$	Velocidade normalizada
$v$	Velocidade de penetração
$d$	Diâmetro do penetrômetro
$C_V$	Coefficiente de adensamento do solo
$TTT$	Transdutores de tensão total
$PPP$	Transdutores de poropressão
$D$	Diâmetro exposto

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
1.1	Considerações Iniciais.....	29
1.2	Objetivos e justificativa.....	30
1.3	Escopo do Trabalho .....	31
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>32</b>
2.1	Escorregamentos Submarinos.....	32
2.1.1	Tipos de Escorregamentos Submarinos .....	33
2.1.2	Dinâmica do fluxo submarino.....	34
2.2	Mecanismos de Ruptura .....	38
2.3	Aquaplanagem.....	40
2.4	Modelo Reológico.....	44
2.4.1	Fluxo de Detritos e a Correlação com Parâmetros Adimensionais .....	45
2.1	Ensaio de resistência Não Drenada (T-bar) .....	49
2.2	Ensaio na Centrífuga Geotécnica.....	53
2.2.1	Grandezas Escalares.....	54
2.3	Modelagem Centrífuga em Escorregamentos.....	56
2.4	Pesquisas Relevantes Acerca de Deslizamentos Submarinos .....	58
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>60</b>
3.1	Ensaio de Lama .....	60
3.1.1	Caracterização do solo .....	60
3.1.2	Preparação .....	61
3.2	Centrífuga Geotécnica .....	62
3.2.1	Containers.....	63
3.2.2	Duto e hastes instrumentados .....	64
3.3	Configuração Geral dos Ensaio .....	66
3.3.1	Instrumentação .....	68

<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>72</b>
4.1	Tensão Total e Velocidade de Escoamento .....	74
4.2	Forças de Impacto .....	77
4.2.1	Número Densimétrico de Froude e Coeficiente de Arrasto.....	79
4.3	Comportamento do Fluxo .....	81
4.3.1	Tensões efetivas e tensões totais.....	81
4.4	Velocidade Média e Tempo de Deslocamento dos Deslizamentos .....	88
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CAULIM .....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO II – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO METACAULIM.....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO III – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA MISTURA.....</b>	<b>100</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Estudos que caracterizam os escorregamentos submarinos e suas consequências em estruturas offshore vem sendo desenvolvidos ao longo dos anos. Entender a evolução do deslizamento durante o escoamento do material bem como sua natureza (velocidade e morfologia) de propagação é necessário para a prevenção e mitigação de desastres.

Escorregamentos de terra submarinos são desastres geológicos marinhos comuns em deltas offshore, plataformas continentais, encostas continentais e bacias de águas profundas, que se manifestam como uma instabilidade local ou em larga escala do fundo do mar (Guo *et al.*, 2022).

Os deslizamentos são causados pela ausência de estabilidade de sedimentos submarinos, provavelmente estimulada por uma elevada poropressão nas interfaces da camada de sedimentos reduzindo sua resistência ao cisalhamento. A ocorrência e evolução do excesso de poropressão em sedimentos são influenciadas por condições hidráulicas e mecânicas, como permeabilidade, resistência e sobrecarga (Jolly e Lonergan 2002; Elger *et al.*, 2018). São processos geológicos e hidrológicos importantes para o transporte de sedimentos marinhos, mas também extremamente ameaçadores, pois trazem impactos e significativas consequências nas instalações offshore e costeiras.

Praticamente a totalidade desses estudos é baseada em ensaios com modelos físicos em laboratório em vista das dimensões do evento real. No entanto, como é requerido pela modelagem física, a similitude deve sempre ser obedecida para que se obtenham resultados representativos nos ensaios em escalas reduzidas.

O uso da centrífuga geotécnica serve de grande auxílio para reproduzir condições geotécnicas, pois permite a correlação entre um modelo reduzido e o protótipo quando submetido a um campo gravitacional modificado (Ferreira, 2020; Yin *et al.*, 2017) uma vez que o campo tensão no modelo é similar ao do protótipo.

Devido à complexidade dos mecanismos envolvidos, a velocidade do fluxo de detritos, uma das variáveis de grande importância no processo, ainda precisa ser melhor estudada quanto à sua aderência às leis de similaridade convencionais e,



portanto, esclarecimentos ainda são necessários quanto à representatividade dessa variável nas leis de escala.

Intuitivamente e para casos específicos, a velocidade é considerada tanto para o modelo quanto para o protótipo como sendo assim independente da escala, dessa forma a velocidade utilizada no protótipo corresponderia a mesma velocidade encontrada no modelo real. Porém, estudos realizados por Gue (2012) mostram que esse pode não ser um entendimento consolidado.

## **1.2 Objetivos e justificativa**

Por se tratar de um assunto pouco abordado em estudos de escorregamentos submarinos o presente trabalho tem como justificativa verificar de que forma o efeito escala influencia na velocidade dos escorregamentos submarinos.

Para fundamentação dessa pesquisa é essencial compreender os fenômenos envolvidos no processo de escorregamentos submarinos. O efeito escala na velocidade de escorregamentos submarinos será o elemento de destaque nesse estudo.

Trata-se de um tema que não é consenso entre os pesquisadores e reflete uma lacuna a ser ainda preenchida nos estudos de corrida de massa submarina.

Diante do exposto, este trabalho em questão tem por objetivo estudar o efeito escala na velocidade de escorregamentos submarinos através de ensaios em centrífuga geotécnica com variação de aceleração para identificação do fenômeno e o possível estabelecimento de uma lei de escala representativa.

A fim de alcançar esse objetivo, foram realizados ensaios de laboratório em centrífuga geotécnica comparando três velocidades de escorregamento induzidos a acelerações diferentes, sendo elas 15g, 35g e 45g para identificação de uma possível lei para o problema específico de fluxo multifásico em meio viscoso.

Como a taxa de cisalhamento, o número densimétrico de Froude e o número de Reynolds são variáveis adimensionais de extrema importância no processo, optou-se por estudar concomitantemente o mecanismo de impacto em um duto para obtenção do coeficiente de arrasto em cada teste executado.

Com isso, os impactos medidos nos dutos durante os ensaios podem ser melhor quantificados, uma vez que sua magnitude depende da velocidade (aceleração) alcançada pelo fluxo de detritos no momento do contato. Um aspecto

secundário desta correção na velocidade reside no caminho percorrido que também é passível de obedecer a uma lei escalar própria, obrigando correções nos resultados projetados para o protótipo e a velocidade de esvaziamento da caixa de lama.

### **1.3 Escopo do Trabalho**

A presente proposta de dissertação é composta por 5 capítulos. O capítulo 1 faz uma introdução ao tema e apresenta os objetivos e justificativa do trabalho. No capítulo 2 é exibida uma revisão bibliográfica composta por tópicos que caracterizam os principais assuntos abordados nesta pesquisa. O capítulo 2 é composto por uma introdução sobre escorregamentos de taludes submarinos, considerações sobre os tipos de escorregamentos submarinos bem como seus aspectos e causas prováveis de ruptura. Apresenta descrições de eventos importantes ligados ao fenômeno como a aquaplanagem e aspectos mecânicos dos materiais envolvidos. Demonstra de que forma a modelagem centrífuga é utilizada para estudar esses fenômenos e aborda as grandezas escalares envolvidas. O capítulo 3 descreve a metodologia usada a fim de obter os resultados das análises. No capítulo 4 os resultados alcançados durante a execução dos ensaios são apresentados. O capítulo 5 é composto pelas conclusões acerca do tema proposto pela pesquisa. As referências bibliográficas transcritas e os anexos são apresentados ao final do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Escorregamentos Submarinos

Os deslizamentos de terra submarinos são desastres geológicos marinhos comuns em deltas offshore, plataformas continentais, encostas continentais e bacias de águas profundas, se manifestando como uma instabilidade local ou em larga escala do fundo do mar (Guo *et al.*, 2022). São processos geológicos e hidrológicos importantes para o transporte de sedimentos marinhos, mas também extremamente ameaçadores, pois trazem impactos e significativas consequências nas instalações offshore e costeiras.

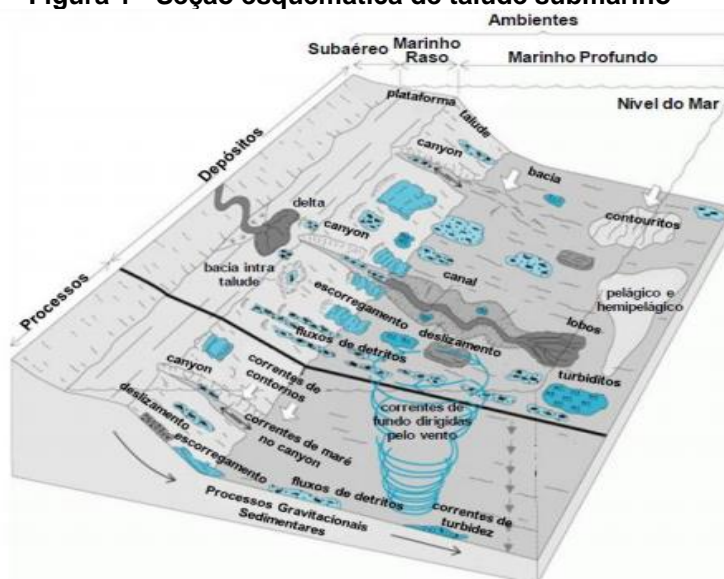
Gue (2012) enfatiza que os deslizamentos submarinos apresentam características como grandes movimentos de massa e podem percorrer longas distâncias em encostas muito suaves.

Em 1956, Terzaghi definiu escorregamentos submarinos como movimentos de massa espontâneos de curta duração que envolvem grandes quantidades de material em taludes suaves e íngremes.

A ausência de estabilidade de sedimentos submarinos é provavelmente estimulada por uma elevada poropressão, nas interfaces da camada de sedimentos reduzindo sua resistência ao cisalhamento. A ocorrência e evolução do excesso de poropressão em sedimentos são influenciadas por condições hidráulicas e mecânicas, como permeabilidade, resistência e sobrecarga (Jolly e Lonergan 2002; Elger *et al.*, 2018).

Os escorregamentos podem ser classificados como uma instabilidade de taludes que englobam correntes de turbidez, fluxo e quedas de rochas. A Figura 1 mostra uma seção esquemática de um talude submarino.

Figura 1 - Seção esquemática de talude submarino



Fonte: Adaptado de SHANMUGAM (2008)

### 2.1.1 Tipos de Escorregamentos Submarinos

Os deslizamentos submarinos estão divididos em translacionais e rotacionais. Locat e Lee (2002) afirmam que os movimentos translacionais apresentam maior frequência de ocorrência no leito submarino e contém inclinação suave, comumente são similares a do talude de origem, com inclinações inferiores a  $5^\circ$ . Enquanto os rotacionais têm como resultado a rotação das massas de solo e/ou rocha e tem origem a partir de superfícies côncavas.

As quedas e fluxos podem ocorrer de três formas apresentadas a seguir:

- **Avalanches**

Sua massa pode conter de solos finos à blocos de rochas e caracterizam um caso extremo de fluxo (Locat e Lee, 2002).

- **Debris Flow (corrida de detritos)**

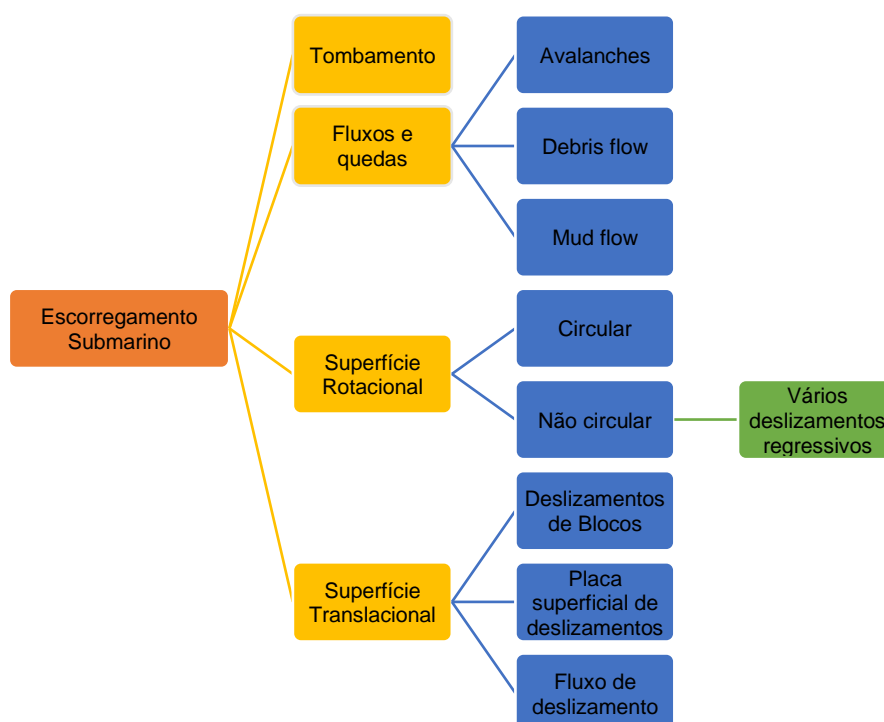
Por definição Zakeri *et al.* (2011) diz que o termo se refere a um fluxo de solo coesivo (predominância de solo argiloso) com concentração de sedimentos a 50% do volume fluidizado, podendo conter fragmentos de rochas e solos granulares.

- **Mud Flow (corrida de lama)**

Composto principalmente por solos finos coesivos é um caso singular de fluxo de detritos.

A Figura 2 mostra os diferentes tipos de escorregamentos submarinos.

**Figura 2 - Tipos de escorregamentos submarinos**



Fonte: Adaptado de FERREIRA (2020) *apud* LOCAT e LEE (2003)

### 2.1.2 Dinâmica do fluxo submarino

Sedimentos submarinos podem, devido à magnitude da sua porosidade, exceder um valor crítico de poropressão e apresentar o comportamento de um fluxo viscoso.

O súbito incremento de poropressão pode fazer com que o solo perca quase que totalmente sua resistência cisalhante culminando no desenvolvimento de uma massa com alto grau de fluidez.

Os fluxos submarinos podem ser divididos em: fase inicial com a ruptura dos blocos e taludes, seguido pela alteração do material liberado e desenvolvimento do fluxo de detritos, formação da corrente de turbidez, fluxo propriamente dito e deposição final.

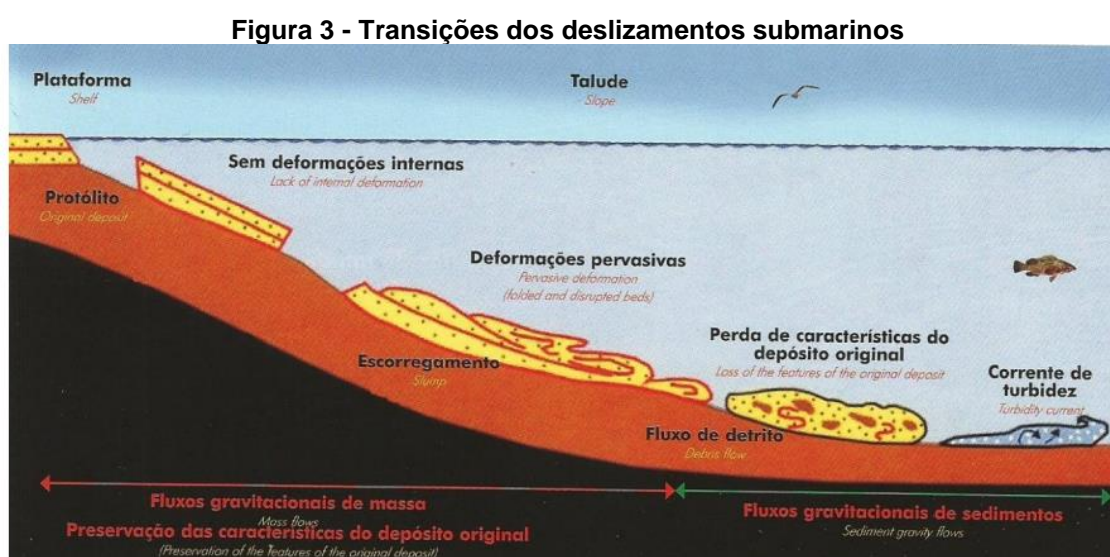
Em relação à sua morfologia, os fluxos são compostos basicamente por três camadas: uma próxima ao fundo, uma intermediária de aspecto fluído e no topo uma corrente de turbidez constituída de sedimentos finos.

A fase inicial tem como base a mecânica dos solos e diz respeito ao início do escorregamento, incluindo o mecanismo de disparo, a fase de fluxo é analisada de acordo com os preceitos da mecânica dos fluidos.

A fase de alteração do material liberado é considerada uma etapa intermediária. Essa fase pode ser abordada sob o aspecto geotécnico, contudo o movimento de massa segue, em geral, as leis de um fluido não-Newtoniano, cuja viscosidade dinâmica e resistência depende da taxa de cisalhamento. O processo de fragmentação pode variar a distância alcançada pelo fluxo, interferindo na velocidade e em outros padrões importantes do fluxo.

Se a desintegração do material for rápida, com acelerada introdução de água, o fluxo pode alcançar maiores distâncias em razão do decréscimo de resistência ao cisalhamento. Para os casos em que a desestruturação é lenta, a resistência do material será um tanto quanto alta, o que pode promover um deslizamento do maciço, limitando a distância percorrida (Hotta, 2019).

Quando o material escorregado deforma e interage com a água do meio ambiente, o deslizamento é denominado fluxo de detritos. Nesta fase o material é considerado um fluido viscoso e apresenta resistência e consistência alterando ao longo da distância percorrida. A Figura 3 mostra as transições dos deslizamentos submarinos.

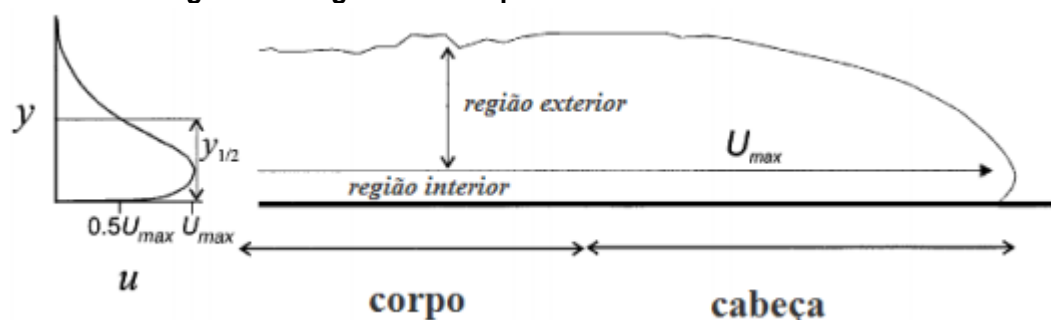


Fonte: Adaptado de D'Avila et al. (2018)

Hotta (2019) aponta que as correntes de turbidez são um fenômeno que pode ser originado pelo desprendimento do material do fluxo principal, provocado tanto pelo

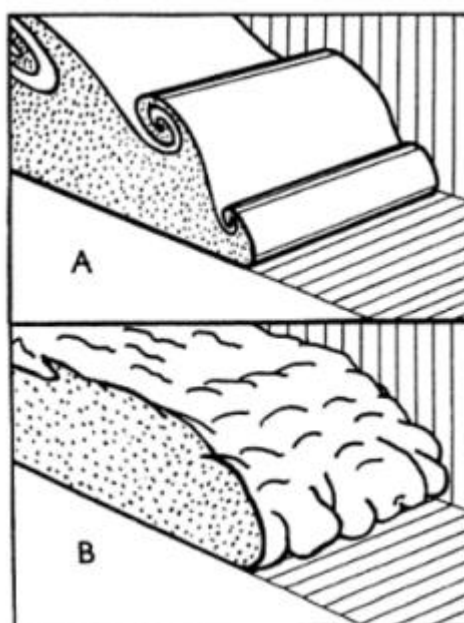
deslocamento do material pela água, quanto pela alteração do regime do fluxo de laminar para turbulento, alterando todo fluxo para uma corrente de turbidez. A Figura 4 representa o diagrama do corpo de uma corrente de turbidez, a região interior tem gradiente de velocidade positivo e uma altura que normalmente é metade da espessura da região exterior, que possui gradiente de velocidade negativo. A altura da velocidade máxima é controlada pela proporção entre as forças de arraste exercidas no limite inferior e superior, e em geral é igual a 0,2 - 0,3 da espessura da corrente. A Figura 5 mostra as formas de instabilidade apresentadas pelas correntes de turbidez.

Figura 4 - Diagrama do corpo de uma corrente de turbidez



Fonte: Kneller e Buckee (2000)

Figura 5 - Formas de instabilidade das correntes de turbidez: (a) Vórtices de Kelvin-Helmholtz e (b) Complexo de lobos e ranhuras

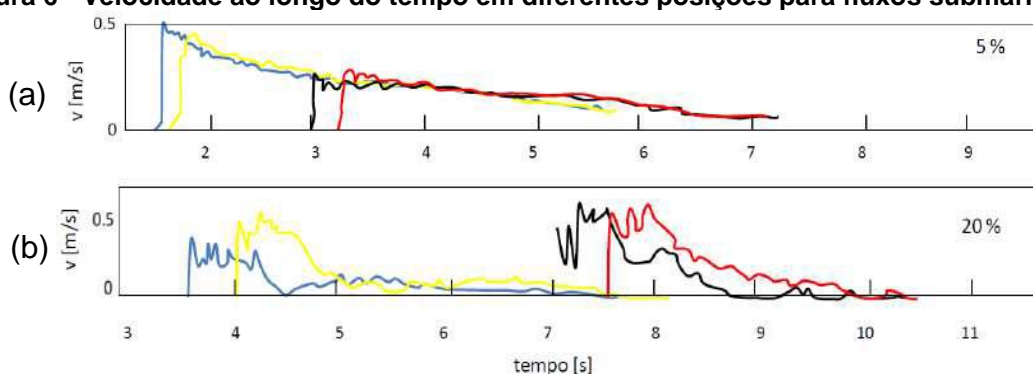


Fonte: Simpson (1997)

Diversos estudos têm se concentrado em simular fluxos de massa, uma das principais descobertas foi a de que os fluxos de detritos submarinos possuem velocidades maiores em pontos específicos e variam de acordo com a concentração de argila. Um trabalho realizado por Breien *et al.* (2007) no laboratório St. Anthony Falls (SAFL) na Universidade de Minnesota estudaram a dependência do ambiente em que o deslizamento ocorre por meio da análise do campo de velocidades utilizando a técnica PIV (PIV – Particle Image Velocimetry), variando as porcentagens de areia e argila simulando fluxos ricos em areia e em argila destacando as diferenças no comportamento dinâmico associado aos dois ambientes.

Foi observado por Breien *et al.* (2007) que em um fluxo de detritos submarinos o comportamento das velocidades frontal e média diferem em diversos aspectos. A velocidade média ao longo do tempo depende da concentração de argila, em fluxos com baixo teor de argila a velocidade média diminui de forma suave e praticamente linear, enquanto para um teor maior de argila desenvolve-se uma cabeça de fluxo com maior velocidade. A Figura 6 mostra a diferença de velocidade para um baixo teor de argila (5%) (Figura 6(a)) e para um alto teor de argila (20%) (Figura 6(b)), as linhas em azul representam o fluxo a uma distância de 3,6 metros, as linhas em amarelo representam um fluxo a distância de 4,1 metros, as linhas em preto representam um fluxo a 7,3 metros e as linhas em vermelho representam um fluxo a distância de 7,6 metros.

**Figura 6 - Velocidade ao longo do tempo em diferentes posições para fluxos submarinos**



**Fonte: Breien *et al.* (2007)**

Segundo Breien *et al.* (2007) a cabeça do fluxo submarino apresenta velocidades maiores em relação ao corpo do mesmo e em virtude disso surge a introdução de uma fina camada de água na base do fluxo, fazendo com que este se



movimente e apresente o comportamento de um bloco deslizante, em um processo conhecido como aquaplanagem.

## **2.2 Mecanismos de Ruptura**

Segundo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, tensão efetiva e resistência ao cisalhamento seguem uma relação linear, sendo assim qualquer alteração na tensão efetiva pode levar a uma redução na resistência ao cisalhamento.

Resultado de uma interação complexa de vários fatores, os deslizamentos submarinos ocorrem com intensidades e escalas diferentes. A estabilidade do solo marinho é determinada pelo ambiente geológico-tectônico-oceanográfico (Silva, 2005).

Os movimentos podem ter início devido ao aumento de tensões cisalhantes ou pela redução de resistência ao cisalhamento do solo, podendo esses dois fatores acontecerem simultaneamente.

Os deslizamentos ocorrem quando a tensão cisalhante excede a resistência ao cisalhamento do material que forma a inclinação. De acordo com a literatura, os deslizamentos submarinos podem ser decorrentes dos seguintes fatores: mudanças morfológicas como processos de erosão ou sedimentação que modificam o equilíbrio das forças atuantes; atividades sísmicas e efeitos de ondas; aumento da poropressão decorrente de deformação ou carregamento na massa de solo; decréscimo das tensões efetivas e diminuição gradativa da resistência ao cisalhamento do material seja por intemperismo ou degradação tanto por acúmulo de deformações causadas por processos de creep ou carregamentos cíclicos (Costa, Amaral e Kowamann, 2004). A Tabela 1 identifica os principais fatores que influenciam na ruptura de taludes submarinos.

Terremotos e atividades tectônicas de acordo com Hance (2003) estão entre as maiores causas de deslizamentos submarinos. A energia sísmica propagada por meio de placas tectônicas é transmitida para o maciço rochoso e liberada por meio de deslocamentos na crosta terrestre. Deslocamentos no bloco rochoso e depósitos de solos subjacentes ocasionam fissuras que podem desestabilizar o solo e levar ao deslizamento. A ampliação dos esforços mobilizados no declive pode ser causada por sismos que também podem ser responsáveis pelo decréscimo de resistência no solo por meio da ruptura.

Em caso de águas rasas, entre 150 e 300 metros de profundidade a ação das ondas podem gerar rupturas no talude. A ruptura pode ser o resultado quando as diferenças de poropressão causadas pela passagem da onda gera no solo tensões maiores que a resistência cisalhante.

Atividades humanas como construções de portos, barragens, entre outros podem ocasionar fissuras em regiões costeiras.

**Tabela 1 - Fatores que influenciam na ruptura de taludes submarinos**

<b>Fatores que influenciam na redução da resistência ao cisalhamento do solo</b>	<b>Fatores que influenciam no aumento das tensões cisalhantes atuantes no talude</b>
<b>Fenômeno Naturais</b>	
Terremotos	Terremotos
Carregamentos por ondas	Carregamento por ondas
Mudanças de maré	Mudanças de maré
Intemperismo	Glaciação
Sedimentação	Sedimentação
Gases e Hidratos de Gás	Erosão
Infiltração de água subterrânea	
Glaciação	
<b>Fenômenos causados pela ação humana</b>	
Hidratos de gases e esgotamento de reservatório	Escavações
	Carregamentos
	Rebaixamentos

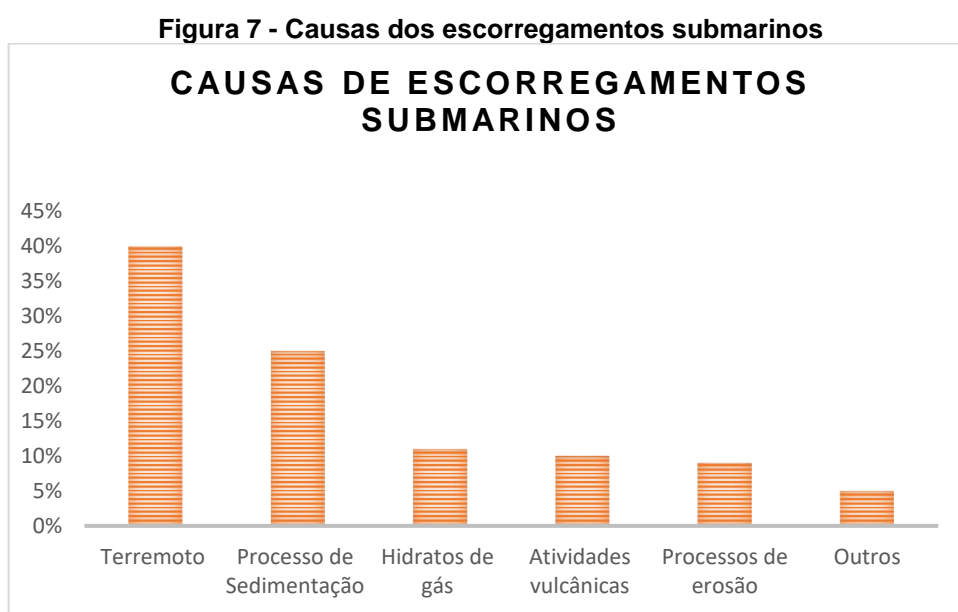
**Fonte: Adaptado de Locat e Lee (2002)**

Hidratos de gás existentes entre as camadas de rocha e solo podem induzi-las a falha. Água e gás natural são responsáveis pela formação dos hidratos de gás, que em certas condições de temperatura e pressão são estáveis. Com modificações na temperatura e/ou pressão, alguns hidratos podem desagregar e liberar bolhas de gás natural, produzindo colapso nos taludes.

Uma aceleração na sedimentação de material pode produzir a elevação de poropressão no solo quando o percurso de drenagem é mais veloz do que o tempo necessário para a consolidação do sedimento, e dessa forma, não permite o aumento da resistência ao cisalhamento com a profundidade. O excesso de poropressão

produzido, mesmo que não cause ruptura, pode conduzir um talude estável a fatores de segurança próximos da instabilidade, o que o torna vulnerável a outros mecanismos de ativação.

O gráfico da Figura 7 mostra o resultado de um estudo realizado por Hance (2003) e compilado por Pardo (2015) indicando que 40% dos escorregamentos são produzidos por terremotos, 25% por processos de sedimentação, 11% pela dissociação de hidratos de gás, 10% por atividades vulcânicas, 9% por processos de erosão, carregamento de ondas, eventos de maré e 5% por atividades humanas.



**Fonte: Adaptado de Pardo (2015)**

No que diz respeito a inclinação dos taludes, o estudo evidencia que 85% das rupturas ocorrem em inclinações inferiores a  $10^\circ$ . O ângulo médio de ruptura é de  $5,8^\circ$ , porém a maioria dos deslizamentos acontecem em intervalos de  $3^\circ$  a  $4^\circ$ .

### 2.3 Aquaplanagem

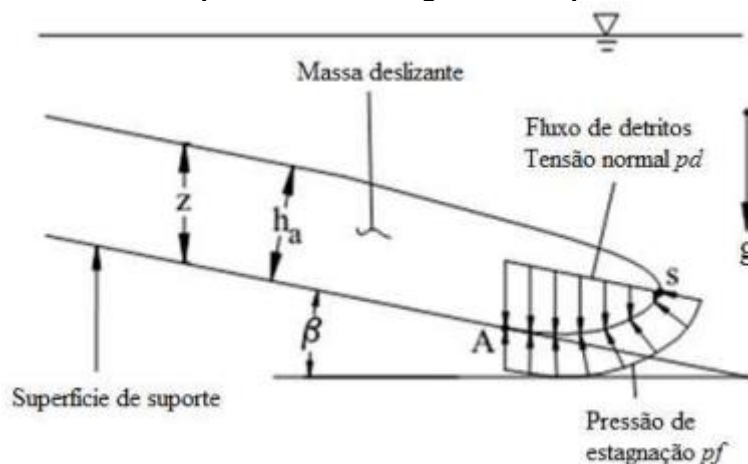
Quando uma camada de fluido se encontra presa entre uma massa de solo deslizante e o solo subjacente, diz-se que ocorreu aquaplanagem, provocando uma redução importante da resistência entre o fluxo e o declive, explicando o motivo de a maioria dos escorregamentos submarinos alcançarem grandes distâncias e apresentarem altas velocidades mesmo em taludes de inclinação suave. É um fenômeno comum em materiais ricos em argila (Iltstad *et al.*, 2004).

Um estudo realizado por Iltstad *et al.* (2004) identificou que em misturas com baixo teor de argila entre 5 e 10%, a deposição do material granular ocorreu de forma rápida e após passada a frente de fluxo, sucedeu ainda um aumento da espessura do depósito. Quando o teor de argila eleva, a taxa de deposição durante o fluxo decai, em misturas ricas em argila não foram observados sinais de deposição durante o fluxo, visto que a alta tensão de escoamento impede essa deposição.

Quatro hipóteses são apontadas para que a aquaplanagem ocorra, primeira hipótese: a pressão hidrodinâmica atuante na região frontal da massa deslizante excede a tensão normal produzida pela mesma sobre a superfície normal de deslizamento. A segunda hipótese é consequência da primeira hipótese que é descrito pela deformação e deslocamento da cabeça do fluxo em relação ao leito marinho. A terceira hipótese está relacionada à pressão hidrodinâmica e a tensão normal, por meio do número densimétrico de Froude. E a quarta hipótese está ligada ao comportamento da tensão total e da poropressão.

Um fluxo subaquático ao avançar através de um corpo de água, induz por meio do movimento do corpo de água na parte frontal da massa deslizante uma pressão de fluido maior do que a pressão hidrostática (Figura 8).

**Figura 8 - Pressão do fluido e pressão do fluxo gerados na parte frontal deslizante**



Fonte: Adaptado de Hance (2003)

Sendo assim a pressão de estagnação do fluido é expressa da seguinte forma por Hance (2003):

$$pf = \frac{\rho_w v_f^2}{2} \quad (1)$$

Onde  $pf$  é a pressão de estagnação do fluido,  $\rho_w$  é a densidade de massa de água e  $v_f$  é a velocidade frontal da massa deslizante. Demonstrando que a pressão hidrodinâmica do fluido depende da velocidade frontal da massa deslizante.

O excesso de poropressão atua desde o ponto de estagnação (ponto S) até a superfície do deslizamento (ponto A) representados na Figura 8. A pressão do fluido produzida pelo peso submerso da massa deslizante no talude, é resistida pela tensão normal equivalente  $pd$  e atua para baixo. A expressão a seguir demonstra o cálculo da tensão normal:

$$pd = (\rho_d - \rho_w)gh_a \cos\beta \quad (2)$$

Onde:

$\rho_d$  a densidade do solo,  $g$  a aceleração da gravidade;

$h_a$  representa a espessura média do deslizamento;

$\beta$  é o ângulo de inclinação do talude.

Quando a pressão hidrodinâmica ( $pf$ ) atuante na parte frontal da massa deslizante excede a tensão normal produzida pela massa deslizante submersa na superfície de deslizamento normal ( $pd$ ) a aquaplanagem ocorre. Na Figura 8 o ponto A corresponde ao início da aquaplanagem.

Acerca da segunda hipótese foi observado que a parte frontal da massa deslizante sofre deformação, provocada pela geração de grandes pressões aerodinâmicas (Mohrig *et al.*, 1999).

O número densimétrico de Froude um parâmetro adimensional usado para caracterizar o fluxo dominado por gravidade envolvendo dois líquidos com densidades levemente diferentes é utilizado para verificar a ocorrência da aquaplanagem. A equação de Froude pode ser representada por:

$$F_{rd} = \frac{vf}{\sqrt{gl \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)}} \quad (3)$$

Onde:

$F_{rd}$  = Número densimétrico de Froude;

$\rho$  = Densidade de um dos fluidos;

$\Delta\rho$  = Diferença de densidade entre os dois fluidos;

$l$  = Distância percorrida.

Reescrevendo a equação 3 em termos de pressão de estagnação do fluido  $pf$  e  $pd$ , tem-se:

$$F_{rd} = \sqrt{2 \left( \frac{pf}{pd} \right)} \quad (4)$$

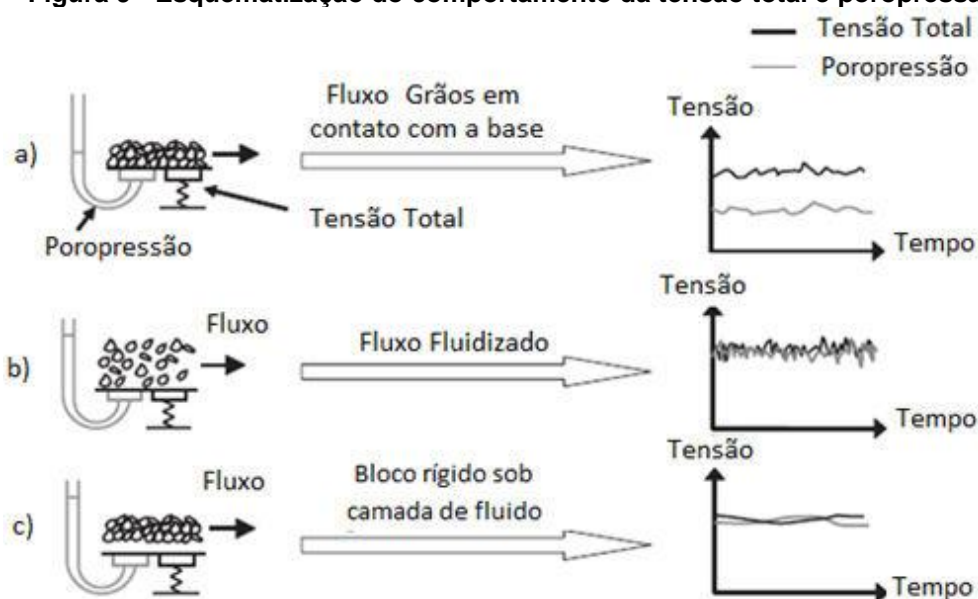
A quarta e última hipótese é observada por meio do comportamento da tensão total e poropressão. Três diferentes situações para o comportamento tensão total e poropressão podem ser observadas (Ilstad *et al.*, 2004):

- A primeira situação é representada na Figura 9(a) e ocorre quando o fluxo de detritos está em contato com o leito marinho.

- A segunda situação é representada na Figura 9(b) o fluxo apresenta comportamento fluido, mesmo que em dado momento os grãos entrem em contato com o leito marinho os mesmos permanecem em suspensão.

- A terceira situação é representada na Figura 9(c) e caracteriza a aquaplanagem, o fluxo apresenta comportamento de um bloco rígido e se move acima de uma camada de água.

Figura 9 - Esquematização do comportamento da tensão total e poropressão



Fonte: Iltad *et al.* (2004)

## 2.4 Modelo Reológico

Conhecer as propriedades e as características de um solo que integra um fluxo de detritos é primordial para o domínio da natureza do fenômeno e do seu comportamento, além de crucial para estudos analíticos e/ou modelagens numéricas do problema. Em 1966, Van Wazer *et al.* estabeleceu a reologia como sendo o estudo do comportamento mecânico e da deformação de corpos devido a ação de tensões sob determinadas condições termodinâmicas em um intervalo de tempo.

Segundo Coussot (1997) a reologia trata os aspectos mecânicos de todos os materiais em termos de contribuições elásticas, viscosas e inerciais, por consequência, materiais que apresentam propriedades como viscosidade, plasticidade, elasticidade e escoamento são de interesse dessa área. A quantidade de finos, a mineralogia da argila, a distribuição granulométrica e o teor de água são definidos como condições que influenciam na reologia do fluido (Hance, 2003).

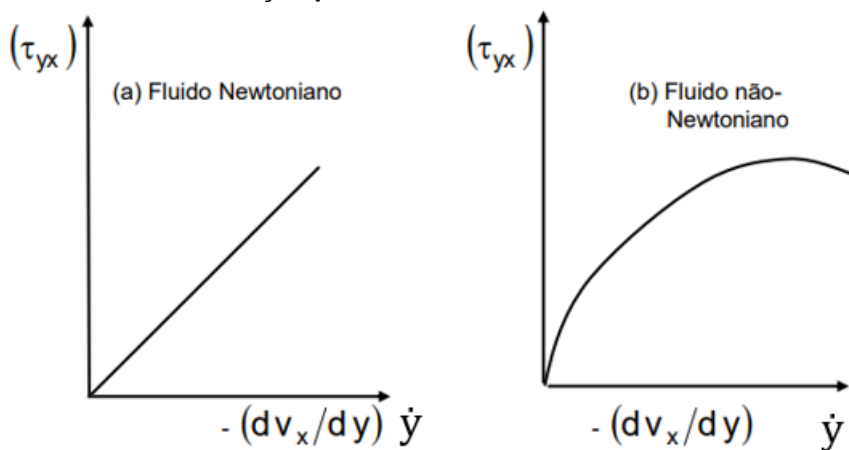
Os fluidos podem ser classificados em Newtonianos e não-Newtonianos de acordo com a relação entre a tensão sobre ele aplicada e a taxa de deformação.

Manica (2009) definiu os fluidos Newtonianos como tendo viscosidade constante e o modelo tensão-deformação apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento aplicada e a velocidade de deformação. Quando os fluidos apresentam uma relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento que

não é constante, ou seja, quando a variação de viscosidade ocorre de acordo com a tensão de cisalhamento aplicada, podendo ter um comportamento de um sólido ou líquido são chamados de Não-Newtonianos.

Em razão da não linearidade na relação entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e a taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ), fluidos oriundos de solos submarinos argilosos são intitulados como não-newtoniano. A Figura 10 demonstra a diferença do comportamento de um fluido Newtoniano e não-Newtoniano por meio dos gráficos de curva de tensão-deformação.

**Figura 10 - (a) Curva tensão-deformação para um fluido Newtoniano e (b) Curva tensão-deformação para um fluido não-Newtoniano**



Fonte: Lopes (2008)

#### 2.4.1 Fluxo de Detritos e a Correlação com Parâmetros Adimensionais

Fluidos oriundos de solos submarinos argilosos são qualificados como Não-Newtonianos, por apresentarem características como não linearidade entre a relação da tensão cisalhante e a taxa de deformação, a viscosidade varia de acordo a tensão de cisalhamento aplicada, sendo assim podem não ter uma viscosidade bem definida apresentando o que chamamos de viscosidade aparente. Para detalhar a relação alguns modelos matemáticos são utilizados, sendo o modelo reológico de Herschel-Bulkley e modelos expressos em forma de potência os mais observados na literatura que trata sobre escorregamentos submarinos (Terrile *et al.*, 2018; Yin, 2018; Sahdi *et al.*, 2014; Zakeri *et al.*, 2012; Bruton *et al.*, 2008; Locat, 1997).

O modelo Herschel-Bulkley tem como Equação 5:



$$\tau = \tau_c + ky^n \quad (5)$$

Onde:

$\tau$  = tensão cisalhante;

$\tau_c$  = tensão de cisalhamento crítica ou tensão de escoamento;

$k$  = coeficiente de consistência relacionado com a viscosidade;

$y$  = taxa de deformação;

$n$  = índice de fluxo.

O índice de fluxo  $n$  designa o quão “não linear” é a relação entre a viscosidade e a tensão de cisalhamento de um material que apresenta comportamento não-Newtoniano. A seguinte relação pode ser observada:

$n < 1$  O material apresenta comportamento pseudoplástico (*shear-thinning*), isto é, sua viscosidade decresce com a elevação da tensão cisalhante;

$n > 1$  O material apresenta comportamento expansivo (*shear-thickening*), isto é, sua viscosidade eleva com o aumento da tensão cisalhante.

A Equação 6 representa a taxa de deformação:

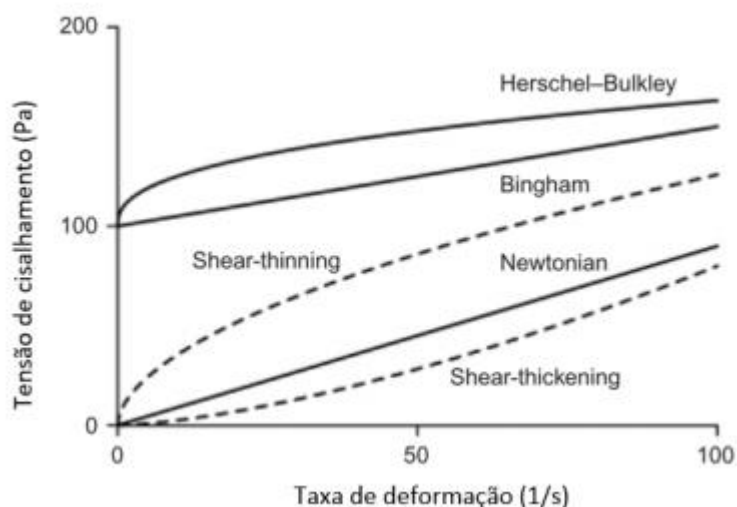
$$y = \frac{v}{D} \quad (6)$$

Onde  $D$  é o diâmetro exposto ao deslizamento e  $v$  é a velocidade do fluxo.

Figura 11 representa o comportamento de um fluido não-Newtoniano por meio do modelo de Herschel-Bulkley. As curvas tracejadas indicam os comportamentos pseudoplásticos (*shear-thinning*) e dilatante (*shear-thickening*). Uma simplificação do modelo de Herschel-Bulkley é representada no comportamento pseudoplástico, considerando a tensão de cisalhamento crítica representada pela Equação 7:

$$\tau = ky^n \quad (7)$$

**Figura 11 - Comportamento reológico dos diferentes fluidos**



**Fonte: Boukpeti *et al.* (2012)**

Entende-se que esses são modelos constitutivos de fluidos viscosos e não são diretamente aplicados a materiais geotécnicos, que são descritos por relação tensão deformação convencionais por serem independentes, em geral, para efeitos práticos, da taxa de deformação. Portanto, do ponto de vista geotécnico os modelos de fluidos devem ser vistos com cautela.

A velocidade com que esses fluidos impactam os dutos deve levar em consideração parâmetros adimensionais como: a velocidade do fluido ( $v$ ), a massa específica ( $\rho$ ), a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), a força ( $F$ ) e o comprimento do corpo submerso ( $l$ ). Parâmetros adimensionais como o coeficiente de arrasto ( $Cd$ ) e o número de Reynolds ( $Re$ ) são muito utilizados para verificações relevantes para realização de ensaios em escala reduzida. A atuação dessas forças é percebida na alteração do escoamento do fluido.

O número de Reynolds relaciona forças inerciais e forças viscosas, caracterizando o escoamento em laminar ou turbulento. A equação a seguir expressa de que forma o parâmetro pode ser calculado:

$$Re = \frac{lv\rho}{\mu} \quad (8)$$

A transição do escoamento laminar para o turbulento pode ocorrer em vários números de Reynolds, pois dependem do grau de perturbação do escoamento, vibrações da superfície, rugosidade da parede, entre outros.

Em uma dada superfície a resistência ao fluido é indicada pelo coeficiente de arrasto e seu cálculo pode ser feito por meio da seguinte fórmula:

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho v^2 A_p} \quad (9)$$

Onde  $A_p$  corresponde à área frontal do corpo submerso.

Zakeri (2009) por meio da análise dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) estudou o impacto de fluxos de detritos submarinos ricos em argila em duto suspenso através de vários ângulos de ataque. Uma formulação empírica para computar o coeficiente de arrasto normal ao eixo de um duto foi proposta pelo estudo de Zakeri (2009). O cálculo foi assim estabelecido pela seguinte equação:

$$C_{D-90} = 1,4 + \frac{17,5}{Re_{\text{não-Newtoniano}}^{1,25}} \quad (10)$$

A equação 11 demonstra o cálculo do número de Reynolds não-Newtoniano ( $Re_{\text{não-Newtoniano}}$ ) apontando para questões de fluxos de detritos impactando em dutos:

$$Re_{\text{não-Newtoniano}} = \frac{\rho v^2}{\tau} \quad (11)$$

Herschel-Bulkley descreve o comportamento de grande parte do fluxo de detritos ricos em argila e Zakeri (2009) correlacionou o modelo reológico descrito Herschel-Bulkley para grande parte dos fluxos de detritos ricos em argila e empregou a seguinte relação:

$$\tau = 161 + 25\dot{\gamma}^{0,4} \text{ (Pa)} \quad (12)$$

Um novo coeficiente de arrasto,  $C'_{D-90}$ , que comporta todos os dados referentes a ângulos de impacto em uma única curva, foi proposto por Liu, Tian e Yi (2015) após reexaminar os dados de Zakeri (2009). A equação 13 representa o novo coeficiente:

$$C'_{D-90} = 0,46 + \frac{23,55}{Re_{\text{não-Newtoniano}}} \quad (13)$$

## 2.1 Ensaios de resistência Não Drenada (T-bar)

Ensaios de campo e de laboratório podem ser utilizados para determinar a resistência não drenada de um depósito argiloso saturado, porém há uma certa dificuldade em obter amostras de qualidade. A execução de ensaios T-bar foi realizada concomitantemente aos ensaios de simulação de deslizamento para obter a resistência não drenada ( $S_u$ ). A resistência não drenada pode ser obtida por meio da Equação 14 a seguir:

$$S_u = \frac{F}{AN_T} \quad (14)$$

Onde:

$F$  = Força atuante no penetrômetro;

$N_T$  = Fator de capacidade de carga;

$A$  = Área longitudinal do cilindro.

A Figura 12 apresenta as dimensões da base cilíndrica do penetrômetro utilizado para os ensaios cuja área longitudinal corresponde a  $1,96 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ .

**Figura 12 - Detalhe da base cilíndrica do penetrômetro**



**Fonte: Ferreira (2020)**

A velocidade de penetração deve ser selecionada assegurando que uma resposta não drenada do solo seja observada. Na equação sugerida por Randolph e Houllsby (1984)  $V > 30$  representa um carregamento em condições não drenada. Sendo  $V$  a velocidade normalizada,  $v$  a velocidade de penetração,  $d$  o diâmetro no penetrômetro e  $C_v$  o coeficiente de adensamento do solo em estudo.

$$V = \frac{v \cdot d}{C_v} \quad (15)$$

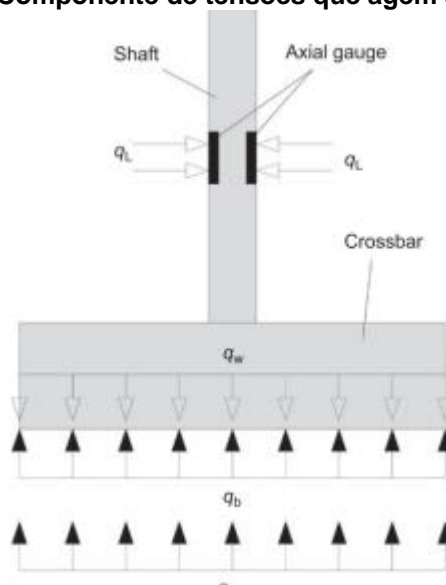
Retirar amostras indeformadas de solo em situação *off-shore* para ensaios de resistência é uma tarefa considerada difícil, pois durante a extração a amostra sofre um amolgamento, sendo assim, o ensaio de penetração de cilindro seria uma ferramenta adicional, já que o leito marinho é basicamente composto por solo mole (Randolph *et al.*, 1998).

Ensaio de campo e de laboratório podem ser utilizados para determinar a resistência não drenada ( $S_u$ ) de um depósito argiloso saturado, em 1991, Stewart e Randolph desenvolveram um ensaio denominado de penetração de cilindro (T-bar) para determinar um perfil contínuo de resistência não drenada em solos moles. Interessante para depósitos argilosos em situação offshore, o ensaio fornece dados de uma resistência não drenada ( $S_u$ ) de forma contínua ao longo da profundidade por meio de um fator denominado  $N_q$ , que é utilizado para determinação da resistência não drenada por não depender das propriedades do solo.

Quando se trata de obter resistência não drenada a utilização dos ensaios T-bar configura uma ferramenta importante e com resultados satisfatórios.

O efeito de flutuabilidade do solo ( $q_b$ ), o peso próprio do solo ( $q_w$ ) e efeito da pressão lateral onde os strain gauges ( $q_L$ ) são fixados estão entre os motivos para a dificuldade em determinar a resistência não drenada para solos com cargas inferiores a 1kPa (Sahdi *et al.*, 2014). A Figura 13 representa as componentes citadas anteriormente.

**Figura 13 - Componente de tensões que agem sobre o T-bar**

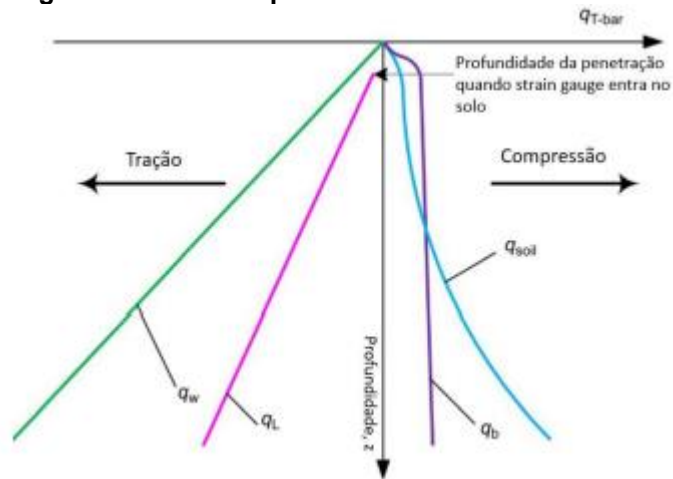


Fonte: Sahdi *et al.* (2014)

No primeiro diâmetro de cravação um acréscimo de resistência ( $q_{T-Bar}$ ) ocorre devido a “força de flutuabilidade” que são forças hidrostáticas que aumentam nos primeiros momentos até que se torne constante. À medida que a barra se move para um raio maior a aceleração centrífuga aumenta, logo seu peso aumenta e o efeito citado anteriormente é atenuado.

É possível observar no que diz respeito a pressão lateral na região dos sensores um acréscimo de cargas de tração que é atribuído ao efeito gerado pela mudança na relação entre deformação lateral e longitudinal, a Figura 14 representa a ação desses efeitos.

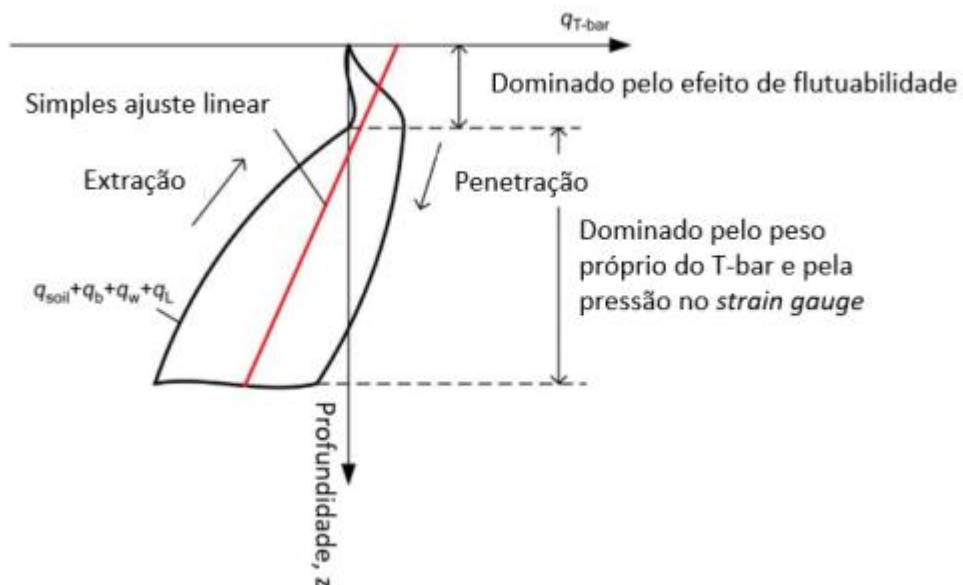
Figura 14 - Fatores que afetam a resistência do T-bar



Fonte: Sahdi *et al.* (2014)

Os ensaios foram realizados em centrífuga geotécnica, utilizando um material que se assemelha ao encontrado no leito marinho e é composto por caulim, metacaulim e água. O perfil da resistência não drenada para esse caso altera de um estado de compressão para um estado de tração, Sahdi *et al.* (2014) sugere uma correção desse problema utilizando a execução cíclica de ensaios T-bar, uma recomendação já sugerida por Randolph *et al.* (2007), comumente empregada em solos muito consolidados. Um offset corretivo, paralelo às linhas de descida e subida do T-bar foi a sugestão para esses casos e é demonstrado na Figura 15 representado pela linha em vermelho.

Figura 15 - Resistência resultante  $q_{T-bar}$



Fonte: Sahdi *et al.* (2014)

As cargas  $q_b$ ,  $q_w$  e  $q_L$  agem sempre na mesma direção, independentemente do movimento do T-bar, a linha em vermelho passa a ser considerado como um novo eixo “y” e uma resposta simétrica do solo é considerada. A componente  $q_{soil}$  age sempre opostamente amovimentação do T-bar.

## 2.2 Ensaio na Centrífuga Geotécnica

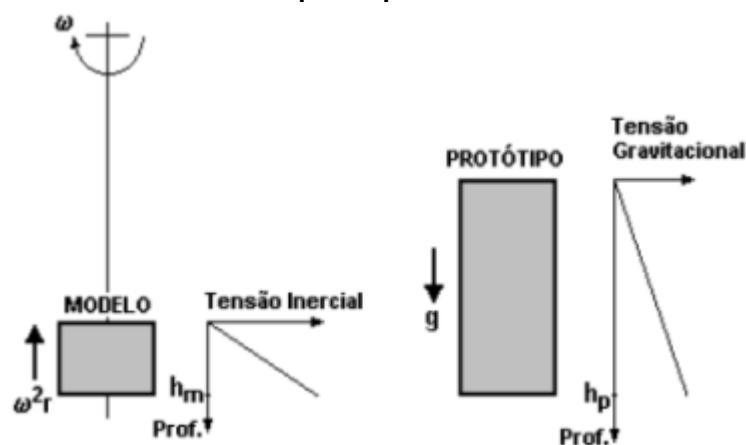
A modelagem centrífuga simboliza um excelente instrumento para estudos no campo da engenharia geotécnica, uma vez que possibilita uma análise em escala reduzida de problemas reais utilizando o próprio solo como material. A modelagem centrífuga reproduz o comportamento de um protótipo em um modelo de escala reduzida submetido à aceleração muitas vezes a gravidade da Terra.

Um experimento a 1g significa que este experimento foi realizado sob as condições de gravidade normal da Terra. Os modelos centrífugos mantêm a proporcionalidade inversa entre o campo inercial gerado e as dimensões do protótipo.

O princípio da modelagem considera que o nível de tensões que atua em uma profundidade  $h_m$  é análoga a uma profundidade  $h_p$  no protótipo, sendo  $h_p = N \cdot h_m$ . Para que essa proporção de tensões seja alcançada as dimensões lineares do modelo devem ser reduzidas por um fator N, e o mesmo deve ser acelerado N vezes a gravidade.

A Figura 16 exemplifica a relação mencionada no parágrafo acima.

**Figura 16 - Correspondência entre tensão inercial em um modelo e a tensão gravitacional no protótipo**



Fonte: Taylor (1995)



Tendo em conta que um protótipo está em equilíbrio perante um campo gravitacional da Terra ( $g$ ), um modelo reduzido, sujeito a ação de uma centrífuga de raio  $R$ , permanecerá em equilíbrio em um campo de aceleração  $Rw^2$ , em que  $w$  é a velocidade de rotação a que o modelo está subordinado. A Equação 16 representa a aceleração aplicada num modelo equiparando-se a  $N$  vezes a aceleração da gravidade.

$$Nq = Rw^2 \quad (16)$$

Dentre as vantagens da utilização da modelagem centrífuga Madbhusi (2015) destaca algumas:

- Possibilidade para análise de problemas complexos por meio da estruturação de modelos físicos em escala reduzida e a elaboração de ensaios em condições de campo gravitacional modificado geotécnico;
- Emprego de instrumentos que possibilitam o registro do desempenho do solo antes, durante e depois da ruptura ser simulada;
- Viabiliza a construção de modelos com histórico de tensões conhecidos e controlados;
- Os laboratórios geotécnicos podem criar modelos precisos e permite a repetição dos ensaios aumentando a confiabilidade dos resultados alcançados e nos comportamentos observados;
- Cargas oriundas de terremotos são capazes de serem simuladas com o desenvolvimento de atuadores customizados;
- Em modelos geotécnicos para que uma similitude seja alcançada é indispensável reproduzir o comportamento do material em termos de resistência e de rigidez.

### 2.2.1 Grandezas Escalares

O modelo reduzido precisa representar fielmente o protótipo, sendo assim o comportamento tensão x deformação deve ser modelado de forma adequada. O protótipo deve ter seu comportamento reproduzido em um modelo de escala reduzida  $N$  vezes, submetido à aceleração centrífuga, utilizando o princípio da modelagem

centrífuga. Processos que dependam da gravidade, como tensões, peso próprio, entre outros serão corretamente produzidos.

O modelo em escala reduzida de  $1/N$  exerce um valor de tensão quando comparada às tensões exercidas pelo protótipo  $N$  vezes maiores.

Se um modelo gerado com um solo de propriedades idênticas ao protótipo e geometria  $1/N$  tiver seu peso próprio aumentado  $N$  vezes devido a aceleração centrífuga, a tensão inicial em um ponto correlato será a mesma tanto no modelo quanto no protótipo, desde que as condições de contorno sejam semelhantes; esta relação denomina-se modelos análogos e forma a base para as leis da modelagem física.

Se o aumento de tensão é exclusivamente determinado pelo aumento de deformação, o campo de deformação do modelo será o mesmo campo do protótipo. Assim: deslocamento do modelo =  $1/N$  deslocamento do protótipo.

Se a distribuição do excesso de poropressão dentro do modelo e do protótipo for similar, então todos os fenômenos primários de fluxo e de adensamento no modelo serão modelados para um intervalo de tempo de  $N^2$  vezes maior do que no protótipo, uma vez que a escala de difusão (adensamento) é  $N^2$  vezes a escala de forças de massa ou inerciais.

A Tabela 2 correlaciona os principais parâmetros de escala utilizados atualmente em estudos de escorregamentos submarinos:

**Tabela 2 - Principais leis de escala**

<b>Parâmetro</b>	<b>Protótipo</b>	<b>Modelo</b>
Aceleração devido à gravidade	1	N
Altura	h	h/N
Alcance (distância run-out)	L	L/N
Densidade do fluxo	$\rho$	$\rho$
Densidade da água	$\rho_w$	$\rho_w$
Poropressão	P	P
Velocidade do fluxo	v	v
Tensão cisalhante	$\tau$	$\tau$
Viscosidade	v	v
Força	F	F/N <sup>2</sup>

Fonte: Autoria Própria

### 2.3 Modelagem Centrífuga em Escorregamentos

Gue (2012) realizou experimentos utilizando uma centrífuga de mini-tambor para simulação de deslizamentos submarinos com níveis diferentes de g a fim de entender as leis de escala envolvidas nos processos de deslizamentos submarinos.

Nas definições atuais, a escala velocidade não sofre influência da gravidade uma vez que a distância percorrida tem razão de escala 1/N e o tempo percorrido tem razão de escala N. Assim a velocidade teria razão de escala igual a 1 e seria independente da escala usada.

As tensões de peso próprio e processos dependentes da gravidade podem ser reproduzidos corretamente por meio da modelagem física, usando leis de escala apropriadas os modelos em escala reduzida podem ser correlacionados à situação do protótipo em escala real.

Ao investigar as leis de escalas envolvidas no processo de deslizamentos submarinos por meio da variação da gravidade induzida o autor demonstrou que a escala velocidade de um protótipo é N vezes a do modelo, levando a um alcance de fluxo de um protótipo N<sup>3</sup> vezes maior que em um modelo, esses resultados foram validados por meio de modelagem numérica.

Em seu estudo Gue (2012) assume que o estado de tensão efetiva independe da deformação (Estado crítico de tensões), pois as deformações são muito grandes, levando a massa fluida ao estado crítico, onde há deslocamento, mas sem alteração do volume e do teor de umidade, a região de contato do fluido com a superfície deslizamento fica sujeita a tensões de cisalhamento produzidas pelo contato.

A previsão da velocidade do fluxo tem por base estudos realizados por Iverson e Denlinger (2001), dados os parâmetros do material e a aceleração da gravidade, validando as proposições feitas por Gue (2012) onde as seguintes correlações são feitas e são apresentadas nas Equações 17 e 18:

$$[\bar{v}_x \frac{3V_f \mu}{(\rho - \rho_w) g_z h^2}]_{modelo} = [\bar{v}_x \frac{3V_f \mu}{(\rho - \rho_w) h^2}]_{protótipo} \quad (17)$$

$$[t \frac{3V_f \mu}{(\rho - \rho_w) g_z h^2}]_{modelo} = [t \frac{3V_f \mu}{(\rho - \rho_w) h^2}]_{protótipo} \quad (18)$$

Onde:

$v_x$  é a velocidade média do fluxo na direção x;

$g_z$  é a aceleração gravitacional;

$h$  é a espessura do fluxo;

$V_f$  é a fração em volume de fluido.

Da combinação das equações 17 e 18 tem-se a equação 19:

$$\frac{t_{modelo} g_{modelo}}{\bar{v}_x modelo} = \frac{t_{protótipo} g_{protótipo}}{\bar{v}_x protótipo} \quad (19)$$

Considerando que o fluxo de detritos sofre deformações de forma que as tensões efetivas independem das deformações, a partir da equação 17, pode se concluir que as leis de escala para velocidade podem ser deduzidas pela seguinte relação apresentadas na equação 20:

$$\bar{v}_{protótipo} = N \bar{v}_{modelo} \quad (20)$$

Sendo  $\bar{u}$  a velocidade média do fluxo.

A Tabela 3 mostra as correlações feitas por Gue (2012) para possíveis novas leis de escala em sua tese.

**Tabela 3 - Correlações para possíveis novas leis de escala**

Parâmetro	Protótipo	Escala do Modelo
Aceleração da Gravidade	1	N
Comprimento	L	L/N
Distância do Fluxo	L	L/N <sup>3</sup>
Área	A	A/N <sup>2</sup>
Volume	Vol	Vol/N <sup>3</sup>
Tensão	$\sigma$	$\Sigma$
Deformação	$\epsilon$	E
Poropressão	u	U
Velocidade do Fluxo	v	v/N

Fonte: Adaptado de Gue (2012)

## 2.4 Pesquisas Relevantes Acerca de Deslizamentos Submarinos

Gue (2012) simulou deslizamentos submarinos em diferentes campos gravitacionais, em uma centrífuga de tambor, com o objetivo de observar as leis de escala envolvidas. Ao final de sua tese uma proposta para novas leis de escala foi sugerida, em especial uma nova correlação para a lei de escala velocidade sendo expressa como N vezes a velocidade no modelo. Sua proposta foi testada por meio de modelagem numérica e se mostraram compatíveis.

Pardo (2015) pesquisou em centrífuga geotécnica modelo viga quais parâmetros influenciam a ocorrência da aquaplanagem em taludes de inclinação suave. Em seus estudos identificou que o teor de umidade tem influência na formação da aquaplanagem quando este é superior ao limite de liquidez do material utilizado.

Pelissaro (2018) procedeu simulações de deslizamentos submarinos em centrífuga de tambor para determinar o perfil de velocidades do fluxo com a ocorrência de aquaplanagem. Nos ensaios houve variação do teor de umidade do material e da pressão de lançamento da mistura dentro da centrífuga. A velocimetria por imagem

de partículas (PIV) foi utilizada para os ensaios com ocorrência de hidroplanagem. A partir de seu estudo os perfis de velocidades de fluxos, a influência do teor de umidade e a energia de lançamento da mistura foram definidos e relacionados com a ocorrência de aquaplanagem.

Santos (2018) realizou ensaios em centrífuga modelo viga para identificar mecanismos atuantes em problemas de impacto de deslizamentos submarinos em dutos com diferentes taxas de exposição em relação à cota do leito marinho. Uma mistura de caulim e metacaulim foi utilizada para representar o solo. O estudo confirmou a ocorrência de hidroplanagem com umidade acima do limite de liquidez e submetida em centrífuga a uma aceleração gravidade de 40g e que o coeficiente de arrasto para misturas ricas em argila aumentou em cinco vezes quando o diâmetro do duto exposto varia de 100% a 25%.

Ferreira (2020) variou as velocidades dos escorregamentos submarinos por meio de ensaios em centrífuga geotécnica modelo viga para identificar como a variação na rugosidade do leito pode influenciar na velocidade e no impacto no duto pelo material escorregado e comparou com estudos de outros autores acerca do tema. Seu estudo concluiu que diferentes rugosidades diminuem a velocidade do fluxo e diminuem a velocidade de impacto do fluxo, como esperado, porém, de maneira não linear.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Ensaio de Lama

##### 3.1.1 Caracterização do solo

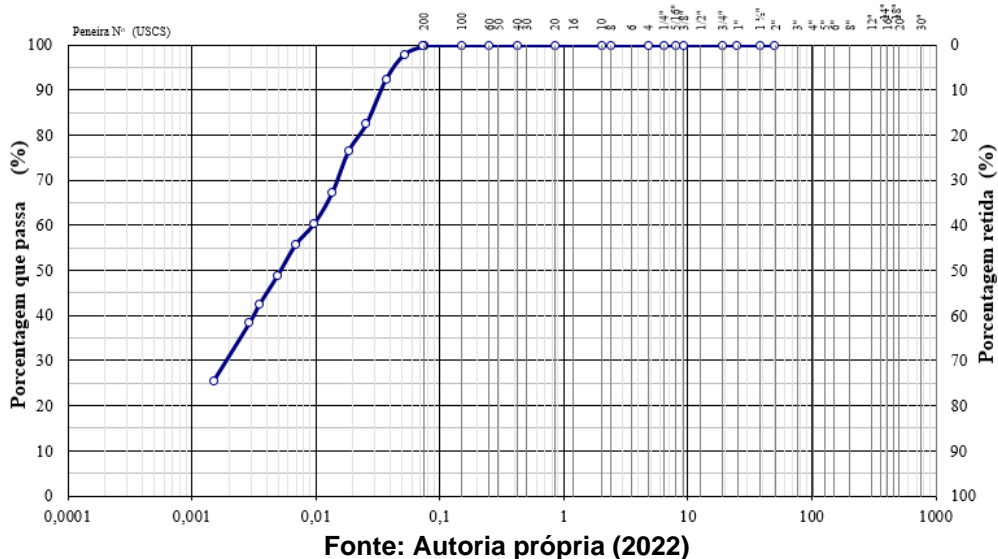
Dando continuidade aos estudos executados na centrífuga geotécnica da UENF a respeito dos escorregamentos submarinos a lama utilizada neste trabalho consistiu em uma mistura de caulim (40%), metacaulim (60%) e água, proporção esta estudada por Melo (2010). A umidade adotada no presente trabalho foi de 1,5 vezes o limite de liquidez da mistura que corresponde a 70,95%.

A caracterização da mistura foi realizada em laboratório em conformidade às Normas Técnicas da ABNT NBR-7181, NBR-6508, NBR-6459 e NBR-7180. O valor em massa do metacaulim utilizado foi de 3,303kg, a massa do caulim utilizado foi de 2,202kg e a massa de água utilizada foi de 3,905kg, as proporções usadas foram as mesmas nos três ensaios.

A Figura 17 apresenta a curva granulométrica obtida do material utilizado para compor a lama dos ensaios. A amostra é composta por 1,3% de areia fina, 68,4% de silte e 30,3% de argila. Apresenta um limite de liquidez de 47,3%, limite de plasticidade e 29,4% e um índice de plasticidade de 17,9%. Os dados completos dos ensaios são apresentados no anexo I.

A Figura 17 apresenta a curva granulométrica obtida do material utilizado para compor a lama dos ensaios. A amostra é composta por 1,3% de areia fina, 68,4% de silte e 30,3% de argila.

**Figura 17 - Curva granulométrica da mistura de 60% de metacaulim e 40% de caulim**



### 3.1.2 Preparação

A preparação da lama ocorre minutos antes do início do voo para garantir que não haja segregação do material. A mistura de caulim e metacaulim foi colocada e batida gradualmente em um recipiente contendo água. O material foi misturado continuamente por cerca de 10 minutos para garantir sua homogeneização (Figura 18), após esse processo foram depositados em dois compartimentos presentes na parte interna do container da centrífuga, estas apresentam mesma altura e largura e são utilizadas para armazenar o material antes do deslizamento e para realizar o ensaio T-bar. Para garantir que a lama contida no compartimento para o deslizamento e a lama utilizada nos ensaios T-bar tenham as mesmas características, ambas foram preparadas juntas e colocadas concomitantemente nas caixas, com mesma altura que para este projeto foi de 0,35m.



**Figura 18 - Preparação da lama utilizada nos ensaios**



Fonte: Ferreira (2020)

### **3.2 Centrífuga Geotécnica**

Os ensaios deste trabalho foram realizados na centrífuga geotécnica, o equipamento projetado e fabricado em 1995 pela Wyle Laboratories, possui carga útil de 1000kgf, com velocidade angular máxima de 227 rpm, gerando um campo gravitacional de até 100 vezes o valor da gravidade. A Figura 19 mostra a centrífuga de viga da UENF.

**Figura 19 - Centrífuga de viga da UENF com o container do ensaio à esquerda e container de contrabalanceamento à direita**



Fonte: Ferreira (2020)

As plataformas basculantes contendo as caixas testes (containers) apresentam tamanhos compatíveis para que protótipos de estruturas geotécnicas sejam modeladas com maior representatividade.

O equipamento é operado na sala de controle da centrífuga e a aquisição de dados e imagens é via wireless, como mostrado na Figura 20.

**Figura 20 - Central de controle da centrífuga**

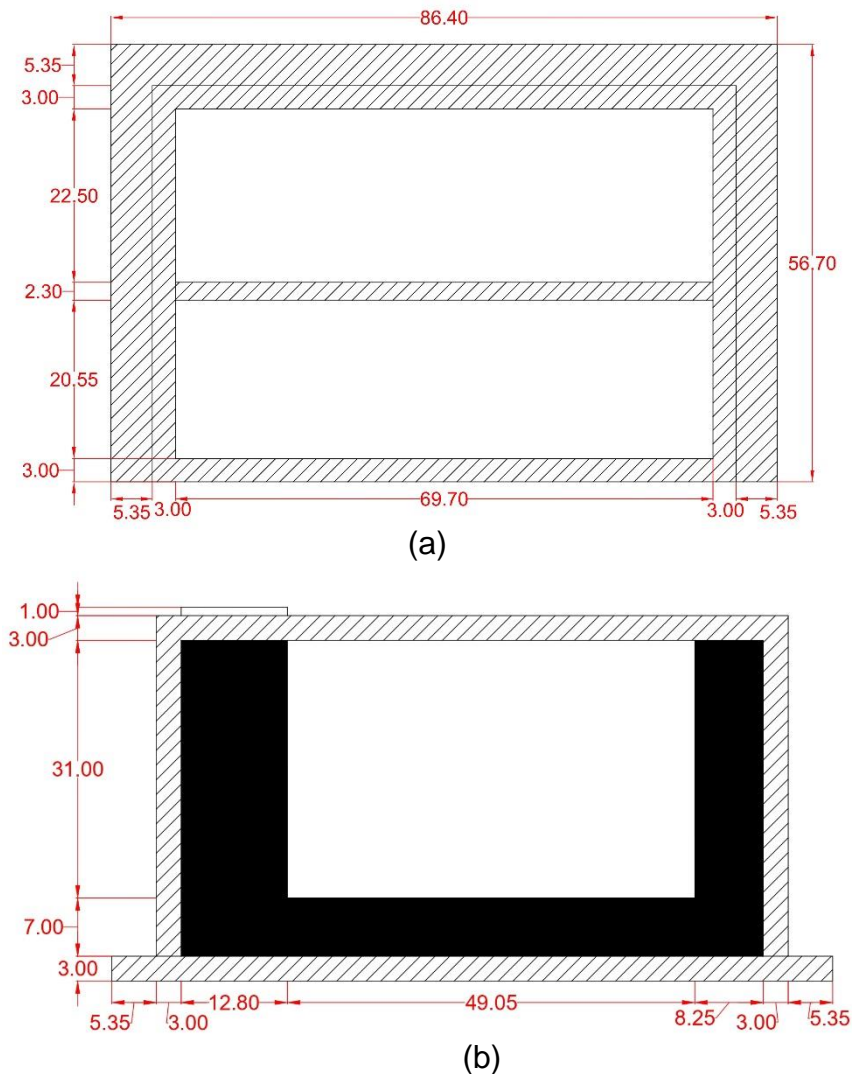


**Fonte: Ferreira (2020)**

### 3.2.1 Containers

A execução dos ensaios na centrífuga são realizados em containers (caixas testes) projetados para suportar cargas elevadas em virtude de os mesmos serem submetidos a esforços induzidos no momento em que a centrífuga inicia sua rotação com a aceleração predefinida para cada ensaio. Na Figura 21 é possível visualizar as dimensões do container utilizado no desenvolvimento do projeto, dentro há um compartimento para reter a lama, uma rampa de acrílico com inclinação de  $3^\circ$  instrumentada com transdutores de poropressão e tensão total, um duto com duas hastes instrumentadas com *strain gauge* e um sistema de absorção de energia de ondas provocadas pelo escorregamento. Um compartimento externo de dimensões 0,11 x 0,11m, mesmas dimensões do compartimento onde é armazenada a lama utilizada nos ensaios de escorregamento é utilizado para realizar os ensaios T-bar . As medidas externas do container são 0,70 x 0,55 x 0,25m.

Figura 21 - Dimensões do container utilizado nos ensaios, (a) Vista superior e (b) Vista frontal



Fonte: Adaptado de Santos (2018) e Ferreira (2020)

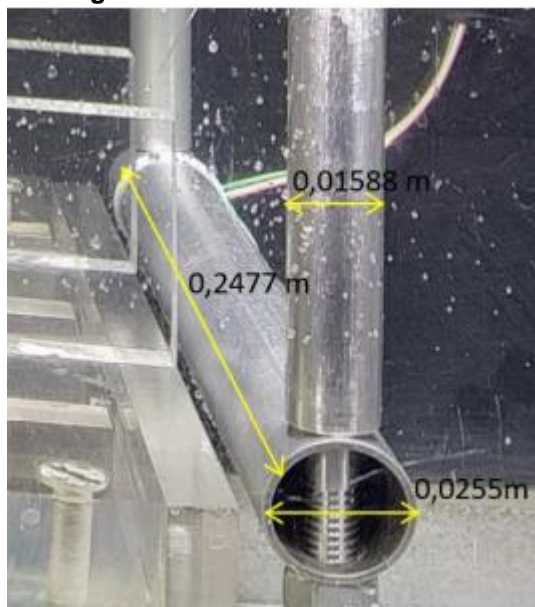
### 3.2.2 Duto e hastes instrumentados

Os deslizamentos foram direcionados para chocarem-se contra um duto de alumínio dotado de duas hastes fixas no container e posicionado ao fim da rampa com o objetivo de detectar a força de impacto causado pelo material deslizado ao chocar-se com o duto. A tubulação possui 0,2477m de comprimento, 0,0255m de diâmetro externo e  $1,9 \times 10^{-3}$ m de espessura, correspondendo a um protótipo de 9,90m de comprimento, 1,02m de diâmetro e 0,076m de espessura.

O duto é fixado por duas hastes suspensas, cada haste com 0,01588m de diâmetro e extremidades engastadas na parte superior do container. A Figura 22

apresenta as dimensões do duto utilizado. Para este ensaio a taxa de exposição do duto foi de 75% acima da rampa de acrílico.

**Figura 22 - Detalhamento do duto**

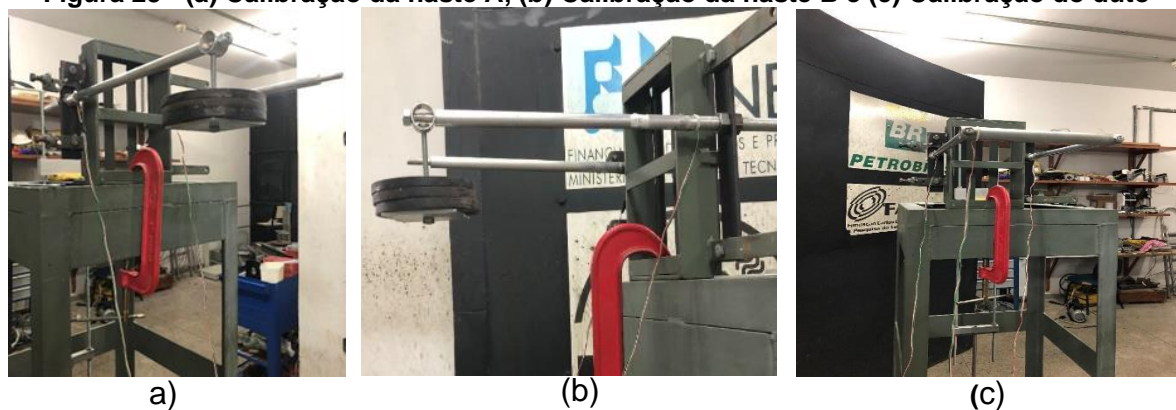


**Fonte: Ferreira (2020)**

As hastes, tanto A quanto B apresentadas na Figura 23 são dotadas de transdutores do tipo *strain gauge* responsáveis por medir a deformação causada pelo impacto do deslizamento ao atingir o duto, maiores detalhes em Ferreira(2020). Para garantir a confiabilidade dos resultados duto e hastes passaram por um processo de calibração antes da realização dos ensaios que consistiu em submeter as hastes e duto a cargas conhecidas e no ajuste do equipamento até forneça uma representação precisa da deformação. Após a calibração o duto foi posicionado dentro do container na altura definida e um medidor de nível a laser foi utilizado para garantir que não ocorressem erros de posicionamento do duto em relação a rampa.

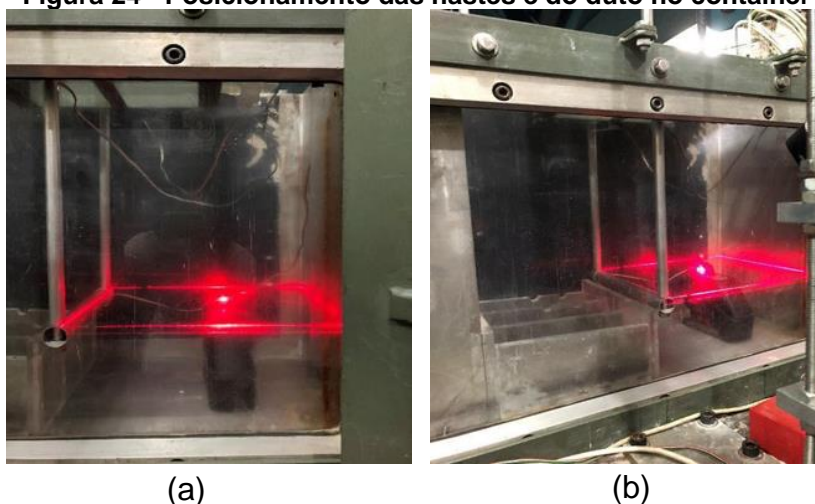
As Figura 23 e Figura 24 representam a calibração das hastes, do duto e a correção do posicionamento do duto utilizando um medidor de nível a laser respectivamente.

**Figura 23 - (a) Calibração da haste A, (b) Calibração da haste B e (c) Calibração do duto**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 24 - Posicionamento das hastes e do duto no container**



Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.3 Configuração Geral dos Ensaios

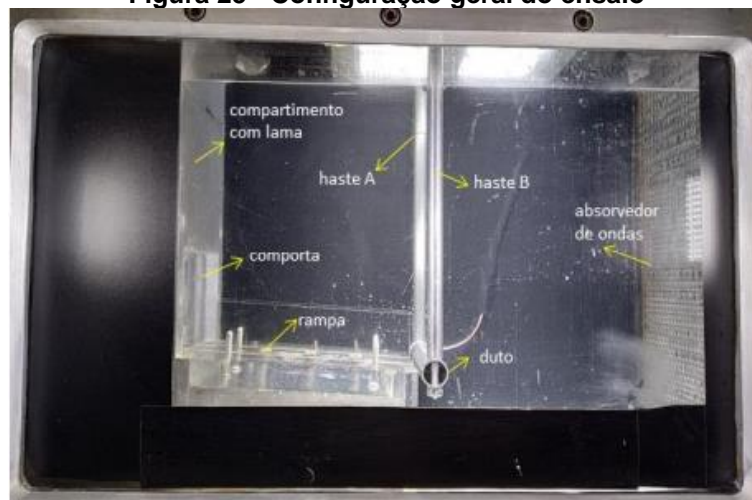
O modelo foi submetido a três rotações gravitacionais diferentes, como demonstrado na Tabela 4.

**Tabela 4 - Rotações gravitacionais dos ensaios**

Ensaio	Aceleração da Gravidade (g)
1	15
2	35
3	45

Fonte: Autoria própria (2022)

O esquema na Figura 25 abaixo mostra uma visão frontal do container pronto para início do ensaio.

**Figura 25 - Configuração geral do ensaio**

Fonte: Ferreira (2020)

Uma rampa de acrílico de inclinação suave (3 graus) foi posicionada de modo a representar o leito marinho, conectando a comporta e o duto.

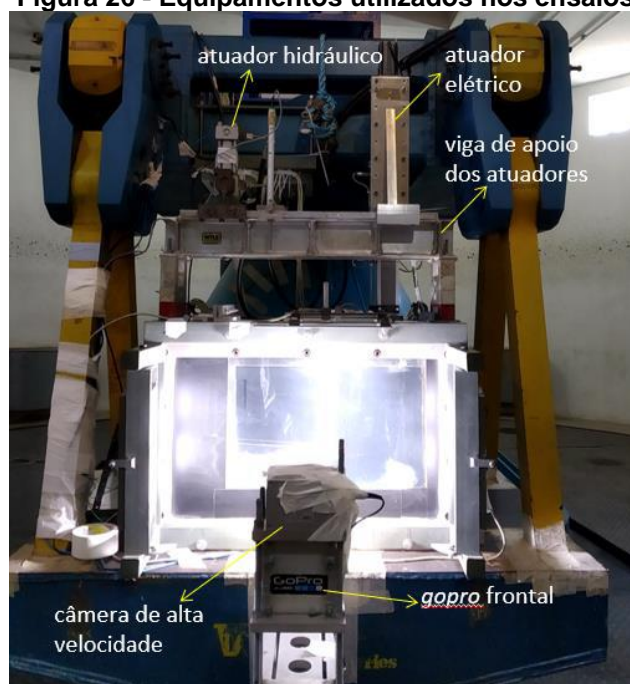
No interior do container, na extremidade oposta ao escorregamento, um absorvedor de ondas foi posicionado para evitar potencial retorno de ondas ao local de ocorrência do escorregamento.

O compartimento da lama é vedado por uma comporta e sua abertura é realizada por um atuador hidráulico presente em uma viga posicionada acima do container.

O compartimento da lama onde foi realizado os ensaios t-bar possui um atuador elétrico responsável por controlar a velocidade do penetrômetro.

A Figura 26 demonstra os equipamentos utilizados nos ensaios.

**Figura 26 - Equipamentos utilizados nos ensaios**



Fonte: Ferreira (2020)

Para realizar a captura das imagens frontais dos ensaios foram utilizadas uma câmera gopro e uma câmera de alta velocidade, modelo HiSpec2 Color da marca FASTEC IMAGING.

### 3.3.1 Instrumentação

Os ensaios físicos em centrífuga geotécnica, para alcançar resultados confiáveis devem apresentar instrumentação e calibração adequadas. A seguir os instrumentos pertinentes ao trabalho serão listados:

- Sensores de tensão total em cada caixa de lama.
- Três Transdutores de tensão total e três de poropressão são posicionados na rampa apresentados na Figura 27.
- Duto instrumentado com um *strain gauge* como apresentado na Figura 28.
- Hastes instrumentadas na parte superior com uma ponte completa de *strain gauge* cada (4 *strain gauges*) compondo uma ponte completa como demonstrado na Figura 29.
- Célula de carga para o ensaio T-bar.
- Dois sensores de fim de curso para o ensaio T-bar.
- Ponte completa de *strain gauge* na haste do T-bar.

A Tabela 5 lista de forma padronizada e abreviada os instrumentos utilizados no trabalho.

**Tabela 5 - Sensores utilizados no ensaio**

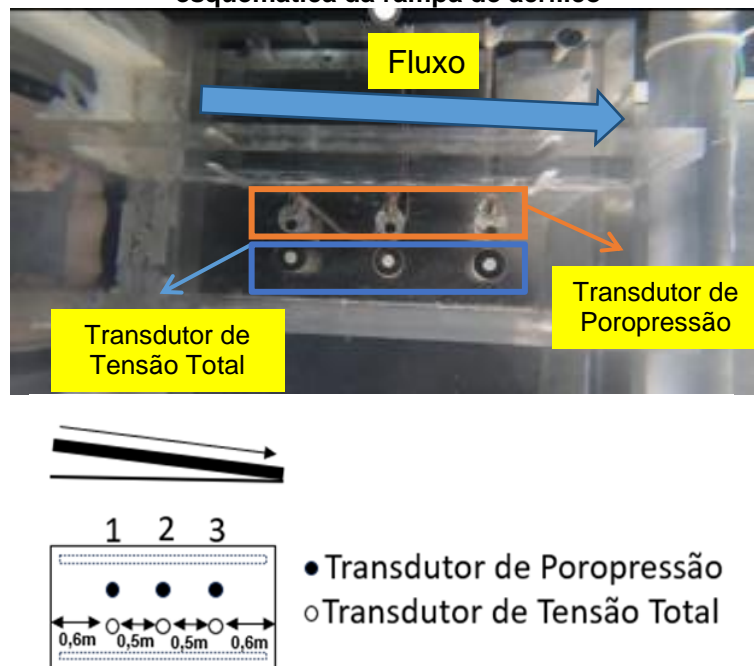
<b>Abreviação</b>	<b>Indicação do local do sensor</b>
TTcx1	Transdutor de tensão total da caixa 1
TTcx2	Transdutor de tensão total da caixa 2
TT1	Transdutor de tensão total da caixa próximo a comporta
TT2	Transdutor de tensão total do meio da rampa
TT3	Transdutor de tensão total próximo ao duto
PP1	Transdutor de poropressão próximo a comporta
PP2	Transdutor de poropressão no meio da rampa
PP3	Transdutor de poropressão próximo ao duto
SGA	Ponte de strain gauge da haste A
SGB	Ponte de strain gauge da haste B

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Na Figura 27 pode ser observada a vista superior da rampa onde se percebe a distribuição de três pares dos transdutores de tensão total (TTT) e poropressão (TPP) e uma representação esquemática da rampa de acrílico com as respectivas distâncias entre os sensores.

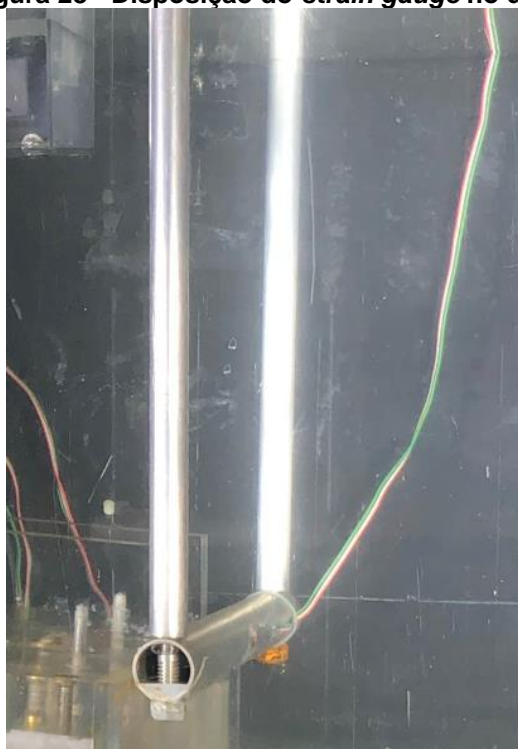


Figura 27 - Posição dos sensores de tensão total e poropressão na rampa e representação esquemática da rampa de acrílico



Fonte: Autoria própria (2022)

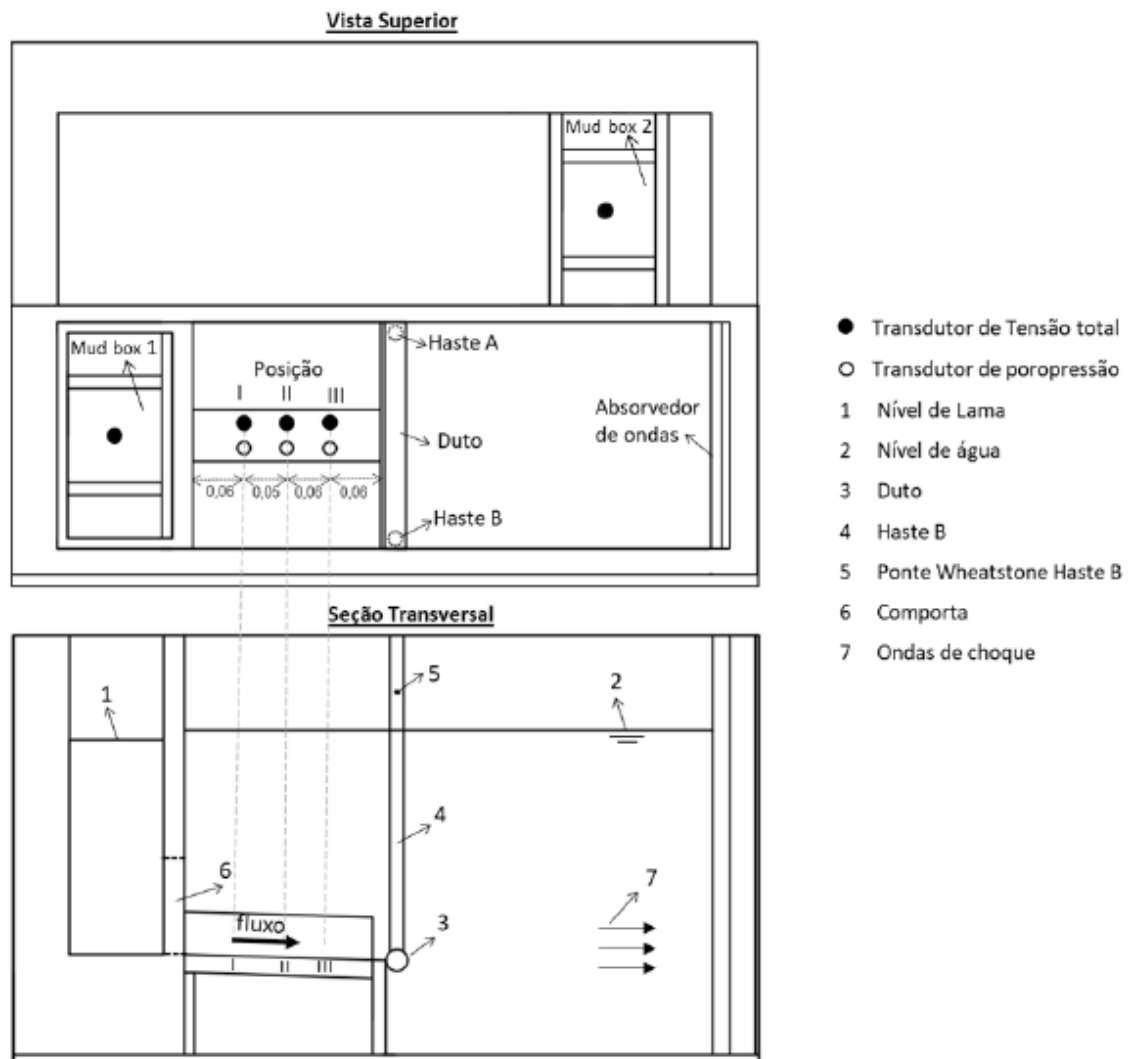
Figura 28 - Disposição do *strain gauge* no duto



Fonte: Autoria própria (2022)

Um esquema do posicionamento dos instrumentos é mostrado na Figura 29.

**Figura 29 - Esquema do posicionamento dos instrumentos**



Fonte: Ferreira (2020)

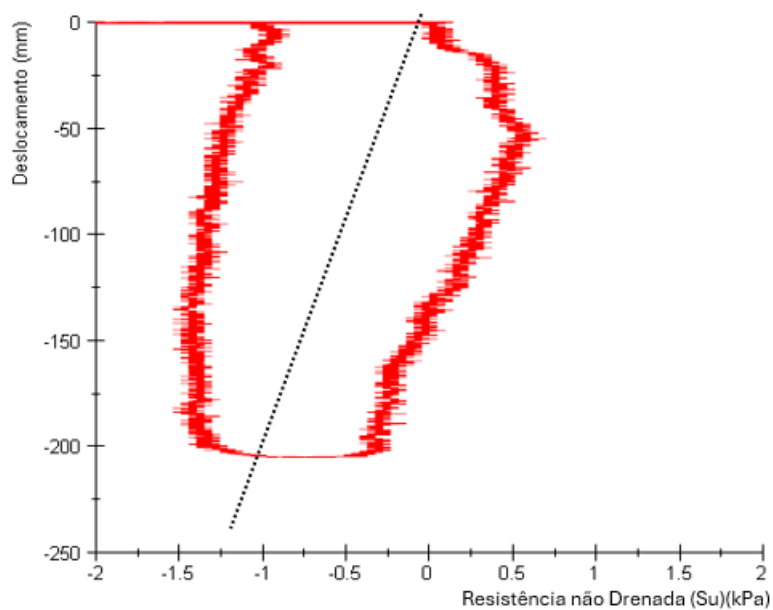
## 4 RESULTADOS

O presente capítulo delinea os resultados alcançados através da condução deste estudo. Foram realizadas três simulações de deslizamentos submarinos, utilizando o modelo reduzido como técnica, variando a indução de gravidade em 15g, 35g e 45g, bem como ensaios para determinar a resistência não drenada (T-bar), todos utilizando o modelo reduzido como técnica e conduzidos em centrífuga geotécnica.

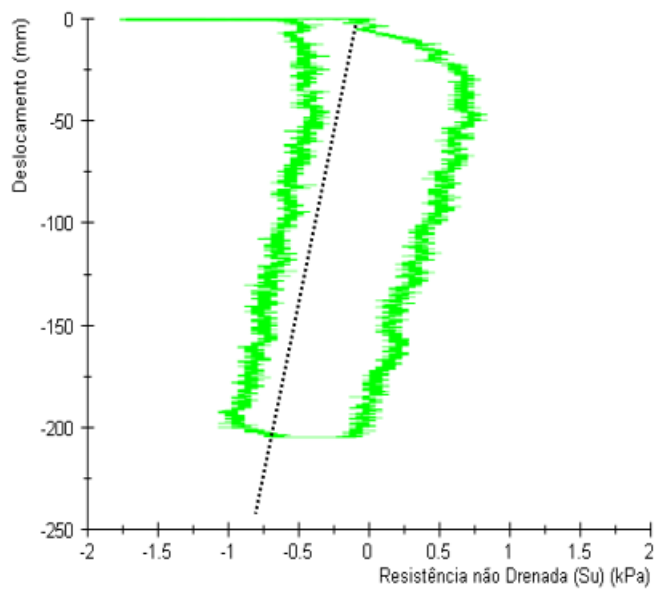
O objetivo primordial deste experimento foi investigar a relação entre o efeito escala e os escorregamentos submarinos, buscando estabelecer a existência de uma proporção entre o modelo em escala e o protótipo real, e como essa relação pode ser validada. Tal investigação visa preencher as lacunas existentes entre as interpretações convencionais e aquelas propostas por Gue (2012) em seu estudo.

### 4.1 Resistência Não Drenada (T-bar)

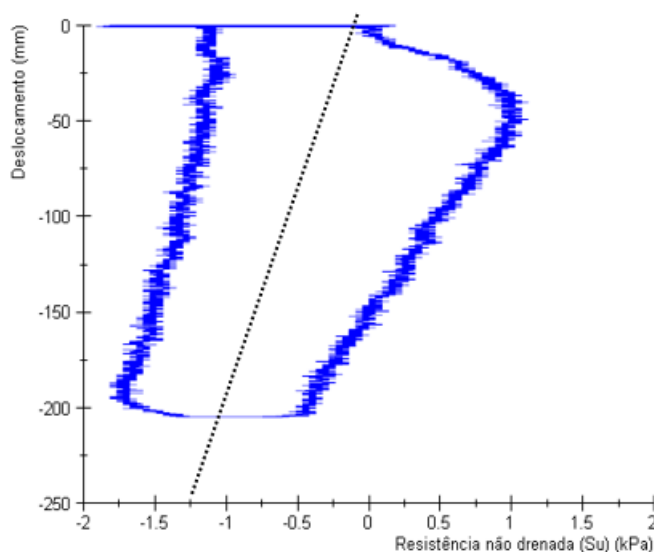
A seguir são apresentados os resultados de resistência não drenada com os dados coletados durante a realização dos ensaios em centrífuga geotécnica, uma condição tratada por Sahdi *et al.* (2014) pode ser observada nas Figuras abaixo, ao penetrar no solo (material preparado em laboratório para simular as condições reais em campo) as forças que atuam tracionando a barra é superior a resultante da barra tracionada (negativo) foi maior do que a resultante de forças que atuam na barra comprimida (positiva), dessa forma parte da resistência aparece na parte negativa do Figura 30, Figura 31e Gráfico 32, registrada logo após os 50 mm de deslocamento.

**Gráfico 1 - Resistência não drenada, ensaio 15g**

Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 2 - Resistência não drenada, ensaio 35g**

Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 3 - Resistência não drenada, ensaio 45g**

**Fonte: A autoria própria (2022)**

A correção desse problema é feita por meio da inserção de uma linha traçada entre dois pontos, formando um novo eixo y (representada pela linha em preto nas figuras acima), ao traçarmos uma linha imaginária paralela ao novo eixo y obtemos os valores de resistência não drenada para os três ensaios.

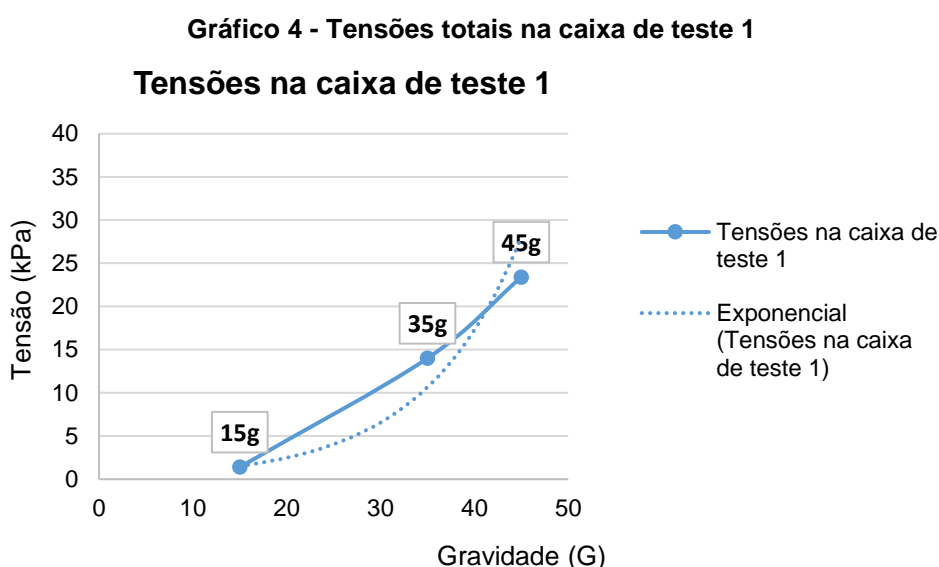
A resistência não drenada foi calculada utilizando a equação 14 e por apresentar valores próximos para os três ensaios, uma média entre os três ensaios foi realizada e o resultado obtido foi de 0,36kPa.

A taxa de deformação é dada pela velocidade do fluxo dividida pelo diâmetro do duto, as taxas alcançadas para os três ensaios tiveram valores próximos e uma média para os três ensaios está representado por  $1,78\text{m/s}^{-1}$ .

#### **4.1 Tensão Total e Velocidade de Escoamento**

As propriedades do material granular bem como seu estado de fluidez estão relacionadas a uma rede complexa de interações que ocorrem entre as partículas, os grãos estão submetidos a forças que resultam dos numerosos contatos entre os grãos. Características como resistência e compressibilidade de um solo saturado podem ser melhor compreendidas através da observação do comportamento das tensões totais a que este solo está submetido, tendo em vista que uma parcela da tensão total é transmitida aos grãos. O material depositado no compartimento interno do container tem sua tensão representada pelo seu peso próprio, pois está sujeito

apenas ao efeito da gravidade induzida durante os ensaios. Essas tensões estão representadas no Gráfico 4 abaixo. Observa-se que as tensões aumentam à medida que a gravidade induzida aumenta, corroborando a influência direta da aceleração da gravidade na distribuição de tensões. A indução de gravidades diferentes tem influência na tensão atuante na massa de solo e pode ser a responsável por desencadear movimentos de massas. Os ensaios aqui são apresentados considerando a aceleração da gravidade induzida, juntamente com as tensões alcançadas para o modelo.

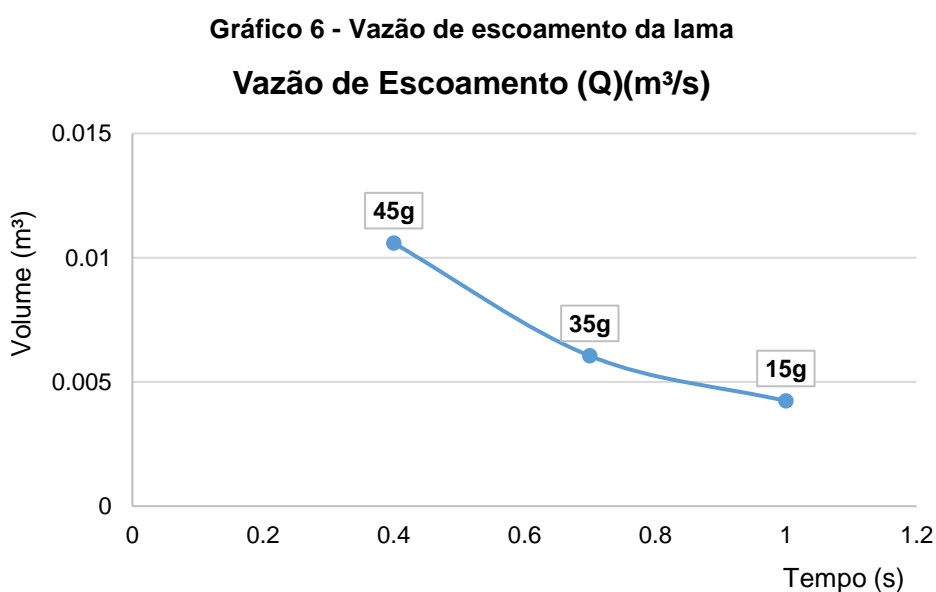
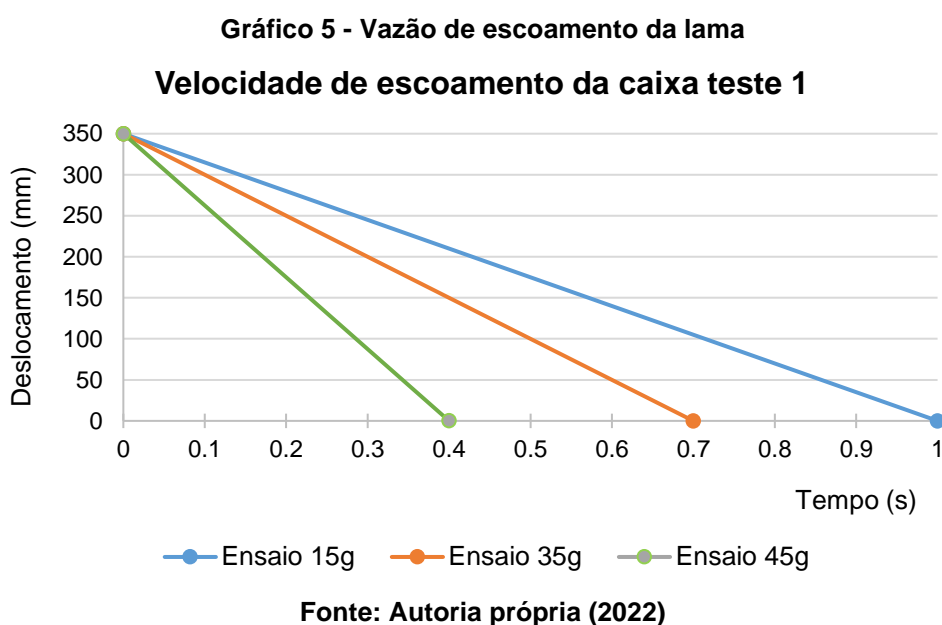


**Fonte: Autoria própria (2022)**

Ao final dos ensaios e 24h após sua realização foram realizadas medições da deposição do material na caixa teste e na rampa e os três ensaios apresentaram uma variação entre 2cm e 4cm para deposição na rampa e entre 20cm e 27cm na caixa teste.

Nos três ensaios a lama foi depositada na caixa teste a uma altura constante que corresponde a 350mm (0,35m). A duração dos escorregamentos variou em cada ensaio, sendo de 1segundo para o ensaio de 15g, 0,7 segundos para o ensaio de 35g e 0,4 segundos para o ensaio de 45g. Considerando que a massa de deslizamento submarino colapsa sob a ação da gravidade e que quanto maior for a altura da massa deslizante maior será a queda, ao abrir a comporta e liberar o material, este se comporta como um corpo em queda livre, convertendo energia potencial gravitacional em energia cinética.

Uma massa em estágio de fluidização tende a mover-se mais rapidamente e causar impactos mais significativos. As velocidades de escoamento e vazão do material estão representadas no Gráfico 5 e Gráfico 6 respectivamente. Considerando que o material utilizado nos ensaios possui a mesma composição, volume e é lançado a mesma altura, variando somente a aceleração da gravidade, observa-se que quanto maior for a gravidade induzida, maior será tanto a velocidade quanto vazão de descarregamento do material. Para o cálculo da vazão foi considerado as dimensões da caixa que correspondem a 0,35m x 0,11m x 0,11m.



## 4.2 Forças de Impacto

A estimativa da força de impacto dos deslizamentos em dutos é de extrema importância para prever quais danos podem causar em estruturas offshore.

Utilizando leis de escalas apropriadas é possível estimar as forças tanto no modelo quanto no protótipo, a relação entre a gravidade e a força de impacto é descrita pelo princípio da conservação da energia mecânica e a magnitude da força depende de vários fatores que incluem massa, velocidade no momento do impacto e características do material deslizado. Sensores do tipo *strain gauges* instalados nas hastes A e B registraram a força com que o duto foi impactado pelo fluxo convertendo força mecânica em força aplicada ou deformação. A Tabela 6 a seguir indica os resultados das forças de impacto alcançadas durante os três ensaios. Ao analisarmos as forças registradas nas hastes, é possível observar que estão igualmente distribuídas. Estudos anteriores como Ferreira (2020), Santos (2018) e Pardo (2015) apresentam resultados semelhantes para as força de impacto obtidas em estudos de deslizamento submarino. Nota-se também que quanto maior a aceleração da gravidade induzida, maior é a força de impacto causada. Ao correlacionarmos modelo e protótipo quanto maior o volume de massa deslizada e velocidade alcançada maiores são forças de impacto.

**Tabela 6 - Forças de impacto**

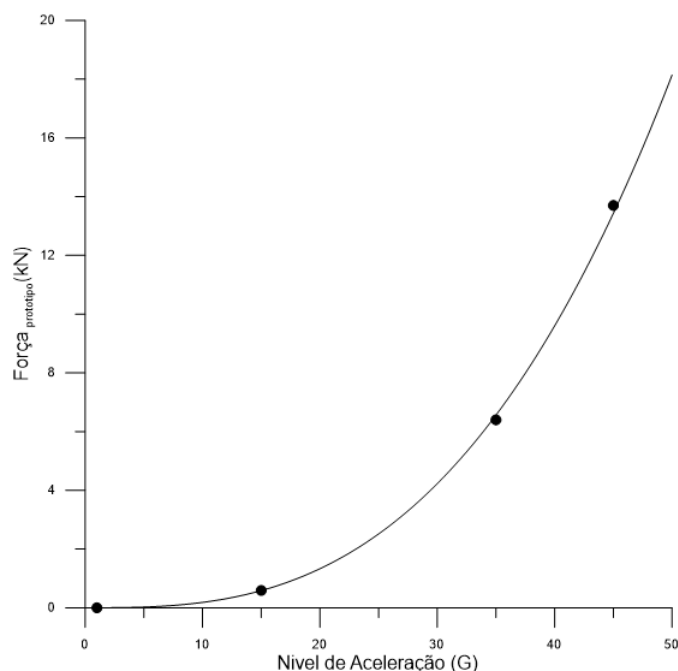
Ensaio (g)	Força <sub>modelo</sub> (N)			Força <sub>protótipo</sub> (N)
	Haste A	Haste B	Total	
15	1,25	1,375	2,625	590,625
35	2,625	2,625	5,25	6.431,25
45	3,5	3,25	6,75	13.668,75

**Fonte: Autoria própria (2022)**

A Figura 30 ilustra a comparação das forças de impacto registradas ao longo dos três ensaios, juntamente com os respectivos intervalos de tempo desde a abertura da comporta.



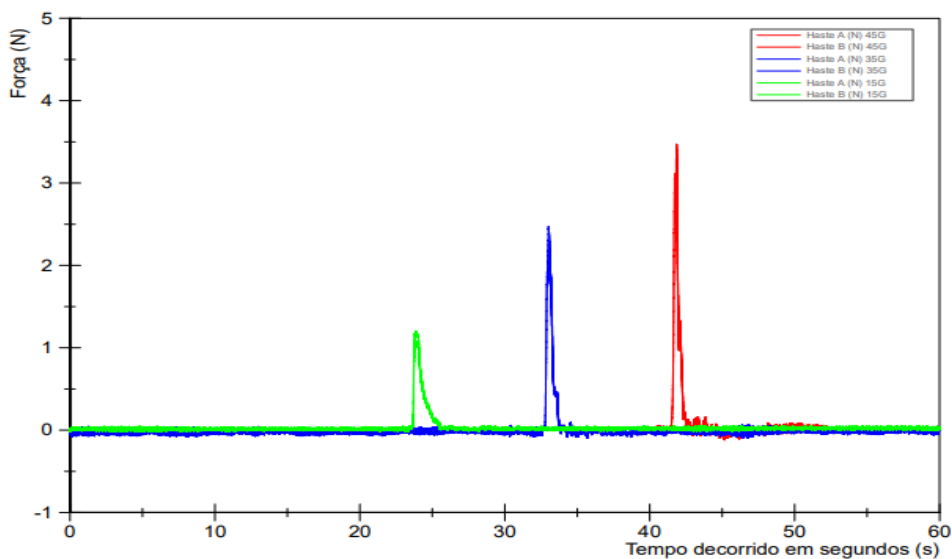
**Figura 30 - Comparação das forças de impacto para os ensaios de 15g, 35g e 45g**



Fonte: Autoria própria (2022)

Em uma escala de 0 a 60 segundos, os ensaios são representados na Figura 32. Nela, o momento em que o duto foi impactado é destacado para cada ensaio. Os picos observados não indicam a duração de cada ensaio, mas sim o instante de tempo em que ocorreu o impacto e as forças alcançadas no modelo. Os resultados obtidos podem ser corroborados por meio da análise de pesquisas anteriores que apresentam valores semelhantes aos encontrados para este ensaio.

**Figura 32 - Comparação das forças de impacto nos três ensaios**



Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.2.1 Número Densimétrico de Froude e Coeficiente de Arrasto

As forças de arrasto estão diretamente ligadas à resistência ao cisalhamento do solo, seja linearmente ou através de leis de potência, incluindo a taxa de cisalhamento. Esta última abordagem aplica os princípios da mecânica dos fluidos, pois considera o solo como totalmente fluidizado (Zakeri, 2009).

Sendo assim faz se necessário a utilização de parâmetros adimensionais para calcular as forças envolvidas nos processos de deslizamentos de terra submarinos e mensurar de que forma afetam as estruturas offshore. Dentro dos parâmetros mencionados anteriormente no trabalho, destacamos três que possuem profunda relação com os eventos ocorridos durante os deslizamentos e são eles: critério de Reynolds, número densimétrico de Froude e coeficiente de arrasto.

O número densimétrico de Froude é utilizado para caracterizar fluxos dominados pela influência da gravidade e está listado entre as condições favoráveis para ocorrência de aquaplanagem. De acordo com Mohrig, Elverhoi e Parker (1999), um número densimétrico de Froude maior que 0,30 é indicativo de ocorrência de aquaplanagem.

Os cálculos da pressão de estagnação, tensão normal e número densimétrico de Froude foram calculados e os resultados obtidos, como descrito na literatura e já mencionado anteriormente, indicam que não houve ocorrência de aquaplanagem nos três ensaios executados. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos três ensaios. A pressão de estagnação foi calculada utilizando a equação 1, enquanto a velocidade frontal do deslizamento foi calculada de acordo com as leis de escalas e pode ser verificada na equação 20. Para o ensaio de 15g, a velocidade frontal foi de 1,14m/s; para o ensaio de 35g, foi de 1,17m/s; e para o ensaio de 45g, foi de 1,5m/s. Os resultados da pressão de estagnação para os três ensaios estão representados na Tabela 8.

**Tabela 7 - Pressão de estagnação**

<b>Ensaio (g)</b>	<b>V<sub>f</sub> modelo (m/s)</b>	<b>p<sub>f</sub> modelo (kPa)</b>	<b>V<sub>f</sub> protótipo (m/s)</b>	<b>p<sub>f</sub> protótipo</b>
15	1.14	0.649	17.84	159.13
35	1.17	0.684	42.78	1830.13
45	1.5	1.13	70.71	2499.95

**Fonte: Autoria própria (2022)**

O cálculo da tensão normal foi realizado empregando a Equação 2. Para determinar a espessura média do deslizamento, considerou-se a altura do material depositado na rampa 24h após o final do ensaio. Os valores encontrados foram de 4cm para o ensaio de 15g, 2,5cm para o ensaio de 35g e 2cm para o ensaio de 45g. O número densimétrico de Froude foi calculado de acordo com a Equação 4 e está representado na Tabela 8.

**Tabela 8 - Pressão de estagnação, tensão normal e número densimétrico de Froude**

<b>Ensaio (g)</b>	<b><math>\rho_d</math>(kPa)</b>	<b><math>\rho_f</math> (kPa)</b>	<b><math>F_{rd}</math></b>
15	117.58	0.649	0.1
35	73.47	0.684	0.13
45	58.77	1.13	0.19

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para estabelecer uma relação entre o modelo e o protótipo são necessários utilizar critérios de similitude entre os dois, sendo assim os números adimensionais são utilizados com objetivo de alcançar resultados que sejam semelhantes entre modelo e protótipo. O deslizamento por apresentar comportamento de fluido viscoso, para que as forças de impacto no duto sejam estimadas faz se uso do critério de Reynolds e as relaciona com o coeficiente de arrasto. Para fluxos não-Newtonianos é necessária uma tensão de escoamento para que ocorra a ruptura, sendo assim a magnitude de força que esses fluxos alcançam está relacionada a sua viscosidade aparente.

O coeficiente de arrasto  $C_D$  foi calculado para cada ensaio realizado de acordo com a equação 9, o cálculo da área frontal foi realizado considerando a taxa de exposição do diâmetro do duto. Seguindo o modelo reológico proposto por Zakeri (2009) o número de Reynolds não-Newtoniano e os coeficientes de arrasto  $C_{D-90}$  e  $C'_{D-90}$  foram calculados por meio das Equações 10, 11 e 14 e são apresentados na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Número de Reynolds e Coeficiente de Arrasto

Ensaio (g)	Taxa de Exposição do Duto (%)	$d_{exp}$ (m)	Re, não-Newtoniano	Coeficientes de Arrasto		
				CD	CD-90	C'D-90
15	75	0,286	8,26	0,48	2,64	3,31
35	75	0,669	9,25	0,016	2,48	3,00
45	75	0,860	15,2	0,007	1,98	2,00

Fonte: Aatoria própria (2022)

### 4.3 Comportamento do Fluxo

Em seu estágio fluidizado o fluxo de detritos e as correntes de turbidez se movem com maior velocidade e tem uma ampla gama de impactos em instalações offshore. Para caracterizar a aquaplanagem de um deslizamento uma sequência de eventos deve ser observada e levada em consideração para que tal condição seja alcançada.

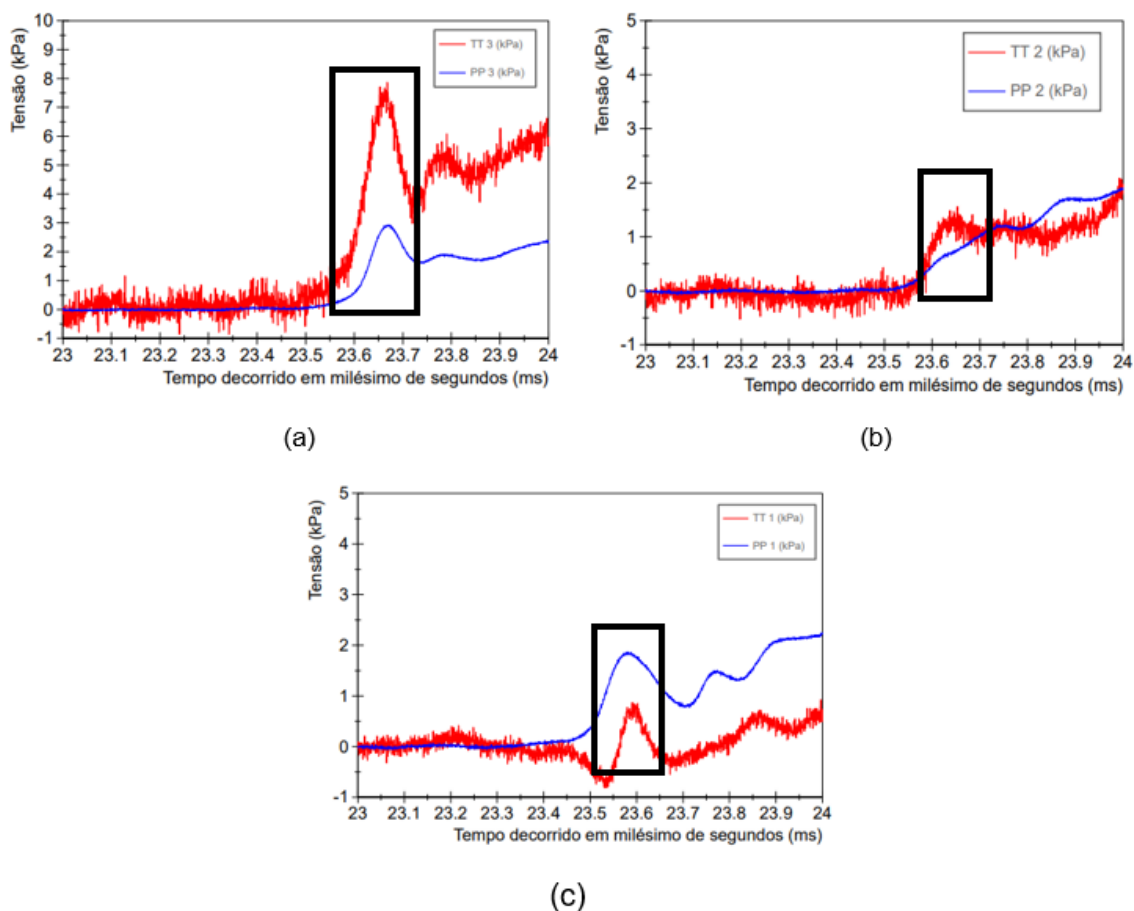
Acréscimo na velocidade, materiais ricos em argila, aumento da cabeça do fluxo, tensões efetivas iguais ou próximas a zero durante todo o deslizamento, são características de um fluxo que sofre aquaplanagem.

#### 4.3.1 Tensões efetivas e tensões totais

A tensão efetiva é responsável pelo comportamento mecânico do solo, efeitos como compressão, distorção e alteração da resistência estão ligados a alteração na tensão efetiva. Mudanças na tensão total ou de poropressão são responsáveis por alterações nas tensões efetivas. No ensaio de 15g o fluxo obedece a uma das três condições estabelecidas para o comportamento de tensão total e poropressão indicativas da não ocorrência de aquaplanagem. O fluxo assim como diz a primeira condição se comporta como um fluido em constante contato com o leito, onde a tensão total é maior que a poropressão gerando uma tensão efetiva maior que zero (positiva).

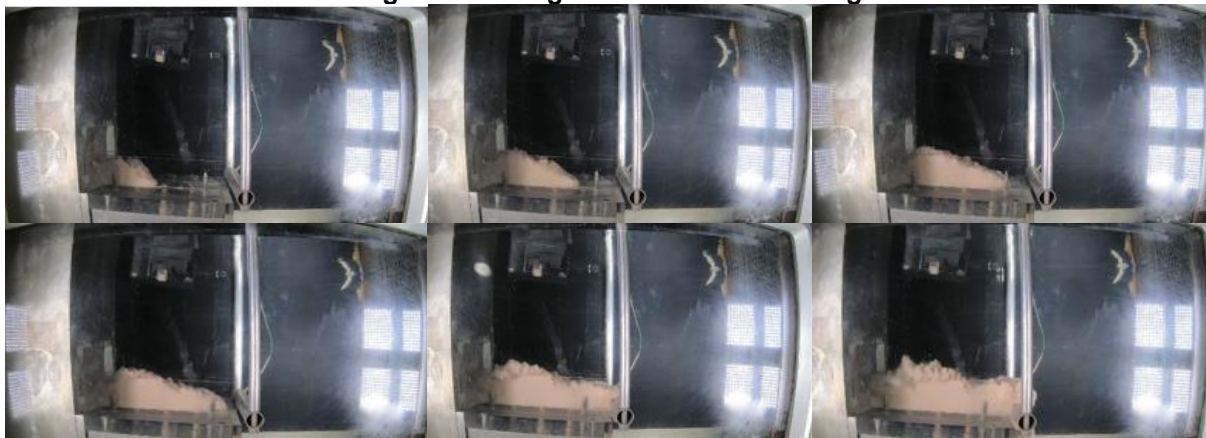
Os Gráficos 7 (a), (b) e (c), a seguir, registrados pelos retângulos em preto, destaca o momento da leitura dos sensores presentes na rampa ao entrar em contato com a massa deslizante para o ensaio de 15g, Gráfico 7(a) representa os sensores de tensão total e poropressão 1, o Gráfico 7(b) representa os sensores de tensão total e poropressão 2 e o Gráfico 7(c) representa os sensores de tensão total e poropressão 3.

**Gráfico 7 - (a) Sensores de TT1/PP1, (b) Sensores TT2/PP2, (c) Sensores TT3/PP3 dos ensaios a 15g**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

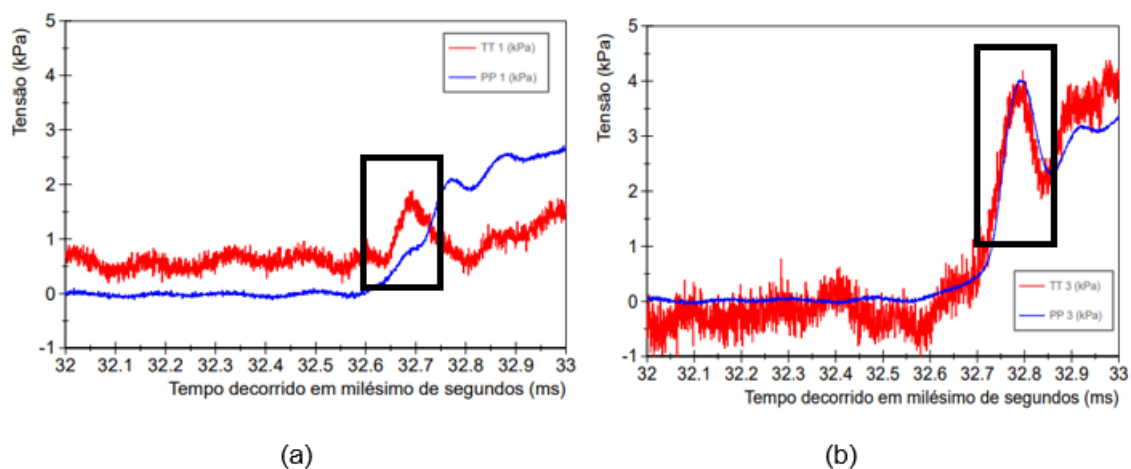
Nas imagens registradas durante o ensaio de 15g não foi possível verificar um aumento da cabeça do fluxo, região da massa de detritos que se move rapidamente e apresenta turbulência intensa, possui uma densidade maior que a porção traseira do fluxo, e nem desprendimento da lama do fundo rampa, comportamento característico de fluxos que sofrem aquaplanagem.

**Figura 31 - Imagens dos ensaios de 15g**

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Nos ensaios de 35g e 45g a massa deslizante obedece a terceira hipótese acerca do comportamento da tensão total e poropressão, as tensões efetivas durante toda passagem do fluxo foram próximas a zero, o que caracteriza um fluxo que se desprende do leito o que possibilita que uma fina camada de água seja introduzida no contato, sendo assim seu comportamento se assemelha ao de um bloco rígido, o que seria característico de um fluxo que aquaplanou.

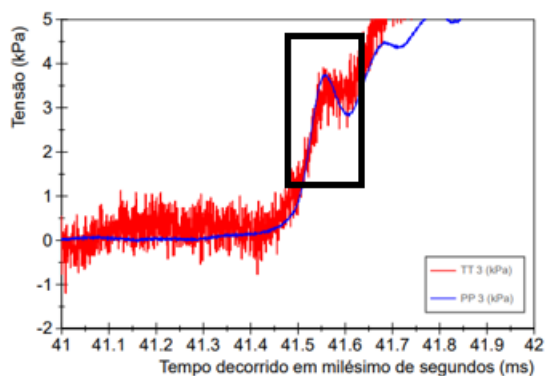
Os Gráficos 8(a), (b) e (c), a seguir, representados pelo retângulo em preto, destaca o momento da leitura dos sensores presentes na rampa ao entrar em contato com a massa deslizante para o ensaio de 35g, Gráfico 8(a) representa os sensores de tensão total e poropressão 1, o Gráfico 8(b) representa os sensores de tensão total e poropressão 3. As leituras dos sensores de tensão total e poropressão na posição 2 apresentaram dados inconsistentes e para este ensaio a representação desse gráfico foi descartada.

**Gráfico 8 - (a) Sensores de TT1/PP1, (b) Sensores TT3/PP3 dos ensaios a 35g**

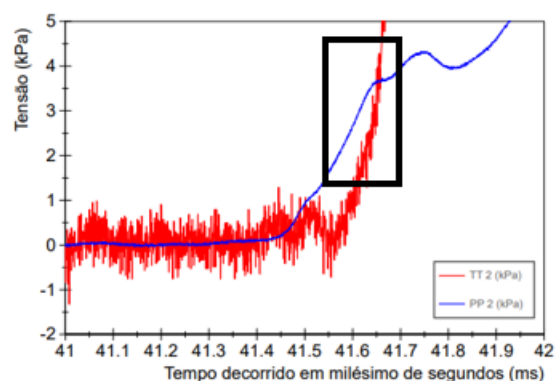
Fonte: Autoria própria (2022)

Os Gráficos 9(a), (b) e (c) a seguir, representados pelo retângulo em preto, evidencia o momento da leitura dos sensores presentes na rampa ao entrar em contato com a massa deslizante para o ensaio de 45g, o Gráfico 9(a) representa os sensores de tensão total e poropressão 1, o Gráfico 9(b) representa os sensores de tensão total e poropressão 2, o Gráfico 9(c) representa os sensores de tensão total e poropressão 3, respectivamente.

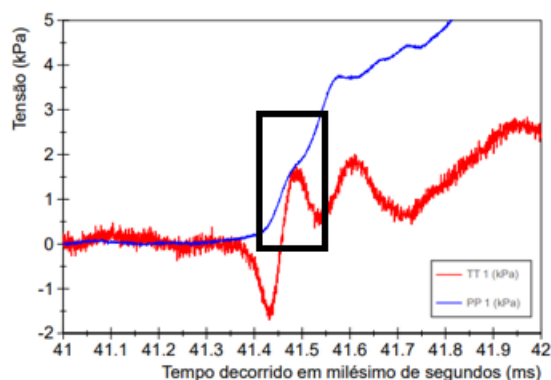
**Gráfico 9 - (a) Sensores de TT1/PP1, Gráfico 7: (b) Sensores TT2/PP2, (c) Sensores TT3/PP3 dos ensaios a 45g**



(a)



(b)



(c)

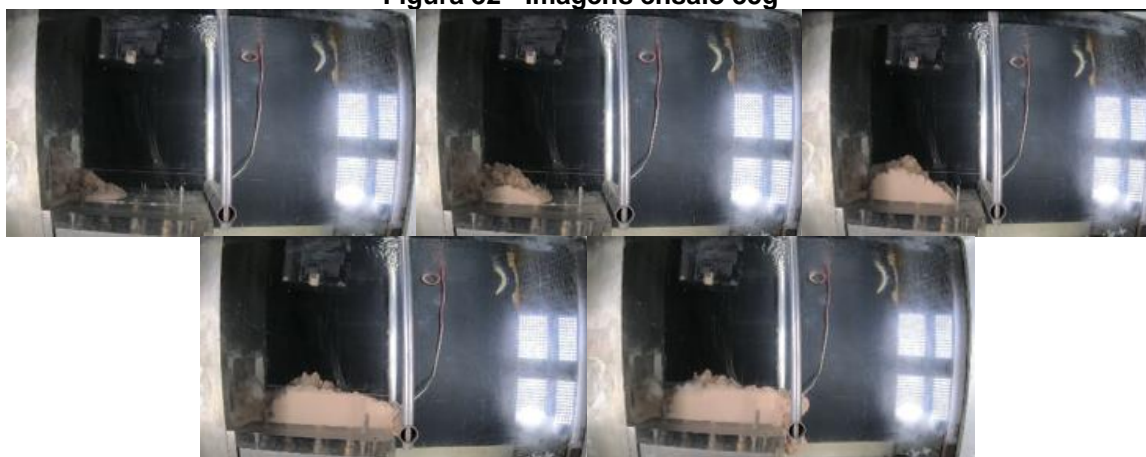
**Fonte: Autoria própria (2022)**

Por meio da análise das imagens não foi possível observar um aumento e nem o levantamento da cabeça do fluxo que seriam comportamentos observáveis em um fluxo em que ocorre aquaplanagem nos ensaios de 35g e 45g.

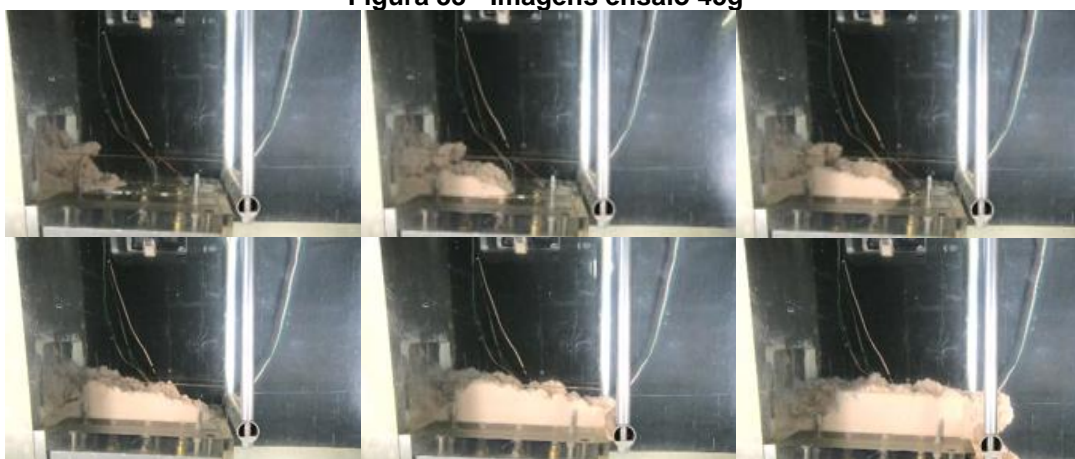
No ensaio de 45g foi observado presença da formação de correntes de turbidez e fluxo de detritos logo na liberação do material, o comportamento turbulento permitiu a formação de vórtices.

A seguir serão apresentadas imagens dos ensaios de 35g e 45g, respectivamente.



**Figura 32 - Imagens ensaio 35g**

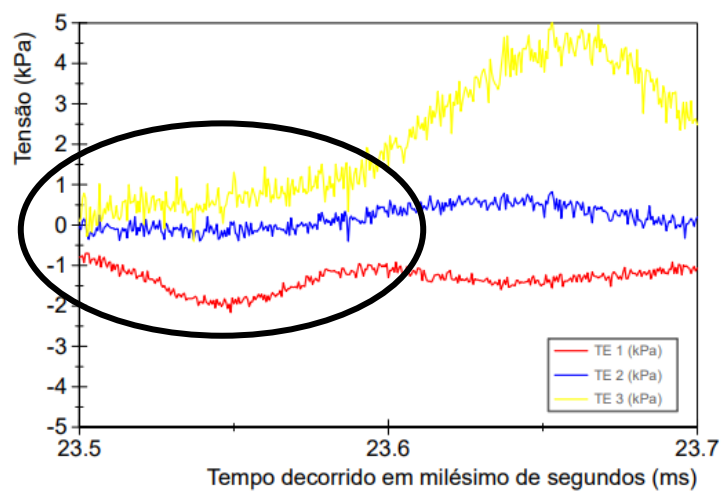
Fonte: A autoria própria (2022)

**Figura 33 - Imagens ensaio 45g**

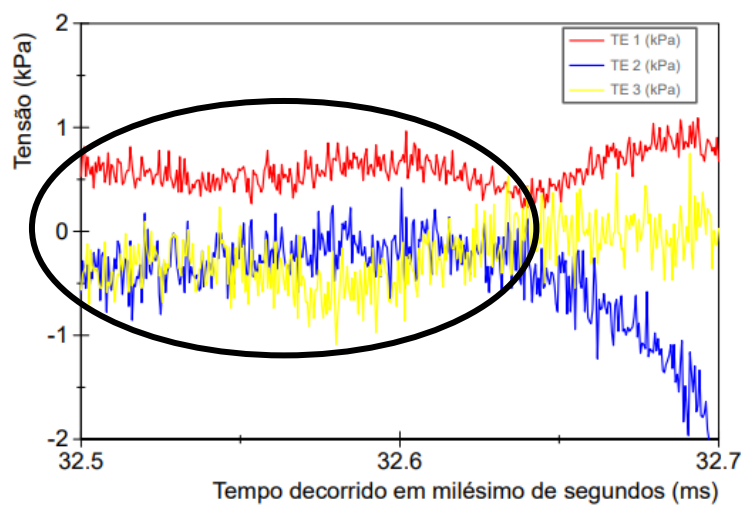
Fonte: A autoria própria (2022)

É possível verificar que as tensões efetivas durante a passagem do fluxo apresentam valores fluando entre tensões efetivas negativas (sucção) e positivas. O Gráfico 10 representa as tensões efetivas durante o ensaio de 15g.

Nos ensaios a 35g e 45g ao observar as tensões efetivas é possível notar que durante a passagem do fluxo as tensões efetivas alcançaram valores bem próximos a zero, o que sugere que o fluxo possa ter aquaplanado. As tensões efetivas registradas pelos sensores estão representadas nos Gráficos 11 e 12, onde o Gráfico 11 representa as tensões efetivas no ensaio de 35g e o Gráfico 12 representa as tensões efetivas no ensaio de 45g.

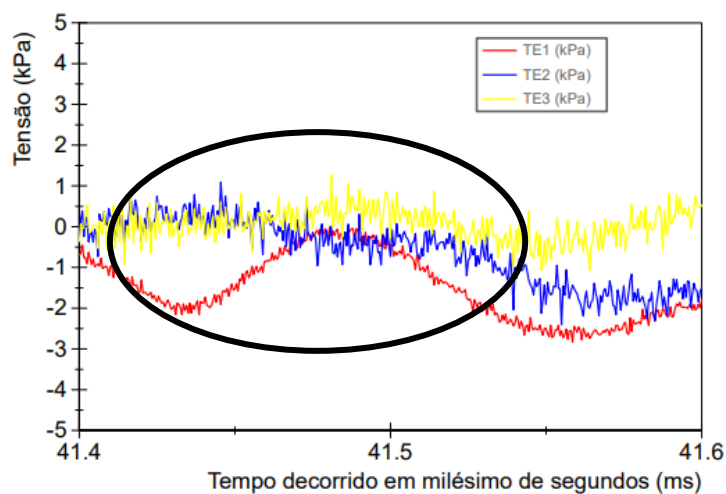
**Gráfico 10 - Tensões efetivas no ensaio a 15g**

Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 11 - Tensões efetivas no ensaio a 35g**

Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 12 - Tensões efetivas no ensaio a 45g



Fonte: A autoria própria (2022)

#### 4.4 Velocidade Média e Tempo de Deslocamento dos Deslizamentos

O deslizamento é caracterizado por uma mistura solo-fluido e se encontra em estado de cisalhamento. Nesse estágio o solo tem o comportamento de um fluido e obedece às leis do estado crítico de tensões, onde as tensões efetivas independem das deformações, a componente fluida do solo confere a ele uma resistência viscosa e a seguinte correlação defendida por Gue em sua pesquisa pode ser feita:  $v_{\text{protótipo}} = N v_{\text{modelo}}$  esta correlação foi explicada detalhadamente na seção 2.7 desta pesquisa.

Nos trechos entre comporta e os sensores de TT1/PP1, bem como o trecho que compreende os sensores de TT1/PP1 e TT2/PP2 o fluxo demonstrou um comportamento instável caracterizado por grande turbulência causada pela abertura da comporta e liberação do material, não sendo possível obter resultados satisfatórios para melhor compreensão do fenômeno envolvendo o efeito escala velocidade uma das propostas da presente pesquisa. Sendo assim foram analisados os trechos que compreendem os sensores TT2/PP2 e TT3/PP3 e TT3/PP3 e duto, onde o fluxo passou pelo tempo de transição necessário para atingir a condição de estado estacionário e assim observações acerca das velocidades alcançadas puderam ser medidas e analisadas.

Os ensaios realizados demonstram que há uma variação de velocidade se compararmos os três ensaios indicando que a lei de escala proposta por Gue (2012)

pode estar correta. A velocidade do fluxo sofre influência direta da aceleração da gravidade, portanto aumenta de acordo com o nível g induzido, indicando que forças adicionais de um nível g mais alto impulsionam o material para um fluxo com maior velocidade. A aceleração da gravidade afeta a taxa de movimento descendentes do material, desde que fatores com resistência e inclinação permaneçam constantes.

As variações de velocidade ocorrem tanto entre os trechos analisados para cada ensaio bem como para os diferentes níveis de g utilizados, sendo o ensaio de 15g ficando com as menores variações de velocidade média do fluxo e os ensaios de 45g aparecendo com as maiores variações de velocidade média para o fluxo. As velocidades no protótipo seguem o mesmo padrão de acréscimo na velocidade média ao aumentar o nível g usados.

A Tabela 10 contém as informações pertinentes ao trecho citado acima para as velocidades no modelo e no protótipo para os três ensaios.

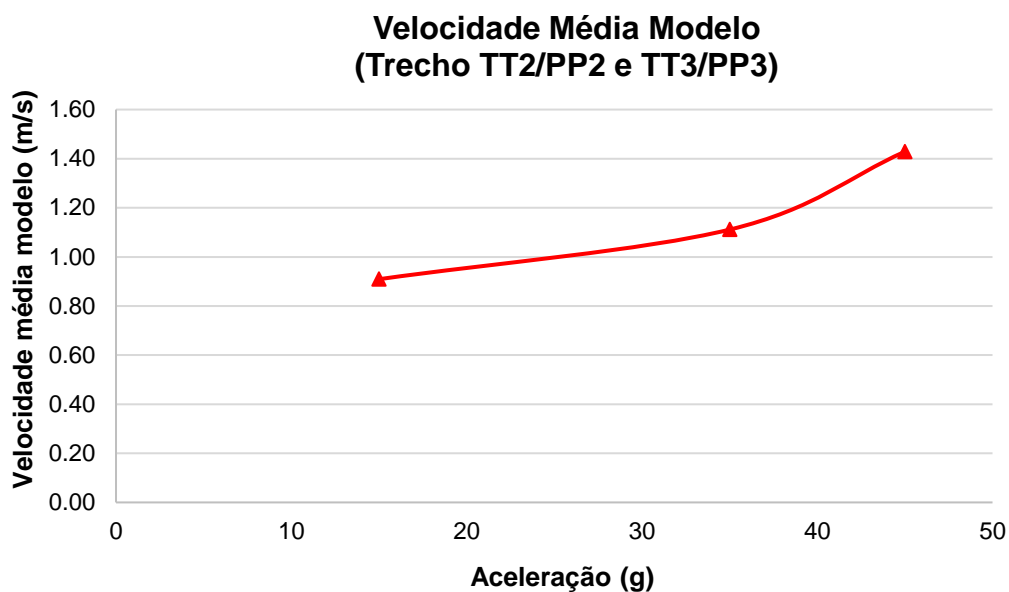
**Tabela 10 - Velocidade média no trecho TT2/PP2 e TT3/PP3**

<b>TRECHO TT2/PP2 e TT3/PP3</b>						
<b>ENSAIO (g)</b>	<b>Deslocamento modelo <math>\Delta_s</math> (m)</b>	<b>Deslocamento protótipo <math>\Delta_{sp}</math> (m)</b>	<b>Tempo modelo <math>\Delta_t</math> (s)</b>	<b>Tempo protótipo <math>\Delta_{tp}</math> (s)</b>	<b>Velocidade média modelo <math>V_f</math> (m/s)</b>	<b>Velocidade média protótipo <math>V_f</math> (m/s)</b>
15	0,05	168,75	0,055	12,375	0,91	13,64
35	0,05	2143,75	0,045	55,125	1,11	38,89
45	0,05	4556,25	0,035	70,785	1,43	64,37

**Fonte: Autoria própria (2022)**

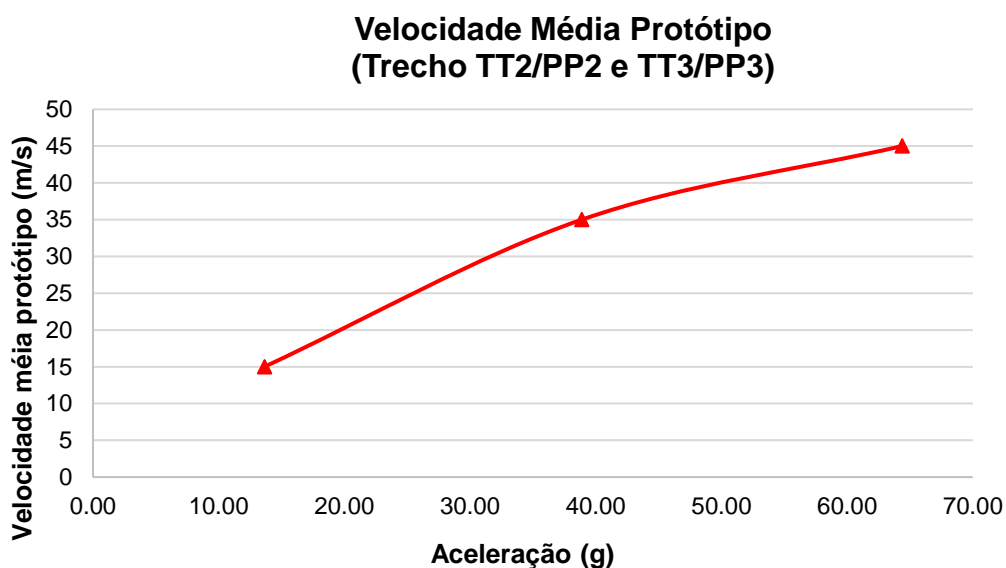
Nos Gráficos 13 e 14 as velocidades médias alcançadas nos três ensaios para o modelo e para o protótipo, respectivamente.

Gráfico 13 - Velocidade média no modelo para os ensaios de 15g, 35g e 45g



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 14 - Velocidade média no protótipo para os ensaios de 15g, 35g e 45g



Fonte: Autoria própria (2022)

No trecho que compreende os sensores TT3/PP3 e Duto o comportamento das velocidades médias o comportamento mantém-se os mesmos observados no trecho dos sensores de TT2/PP2 e TT3/PP3, variando de acordo a variação do nível g usado no ensaio.

A Tabela 11 contém as informações pertinentes ao trecho citado acima para as velocidades no modelo e no protótipo para os três ensaios.

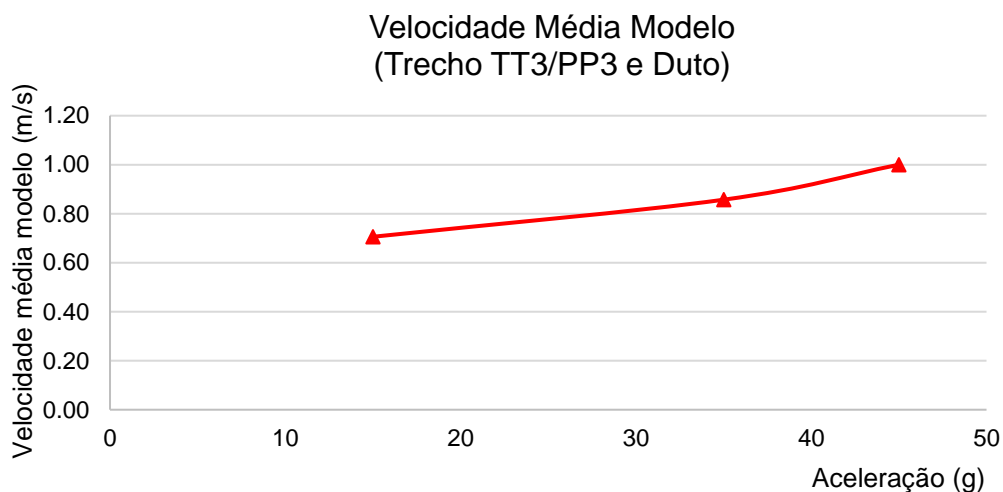
Tabela 11 - Velocidade média no trecho TT3/PP3 e Duto

TRECHO TT3/PP3 e DUTO						
ENSAIO (g)	Deslocamento modelo $\Delta s$ (m)	Deslocamento protótipo $\Delta s_p$ (m)	Tempo modelo $\Delta t$ (s)	Tempo protótipo $\Delta t_p$ (s)	Velocidade média modelo $V_f$ (m/s)	Velocidade média protótipo $V_f$ (m/s)
15	0,06	202,5	0,085	19,125	0,71	10,59
35	0,06	2572,5	0,07	85,75	0,86	30,00
45	0,06	5467,5	0,06	121,5	1,00	45,00

Fonte: Autoria própria (2022)

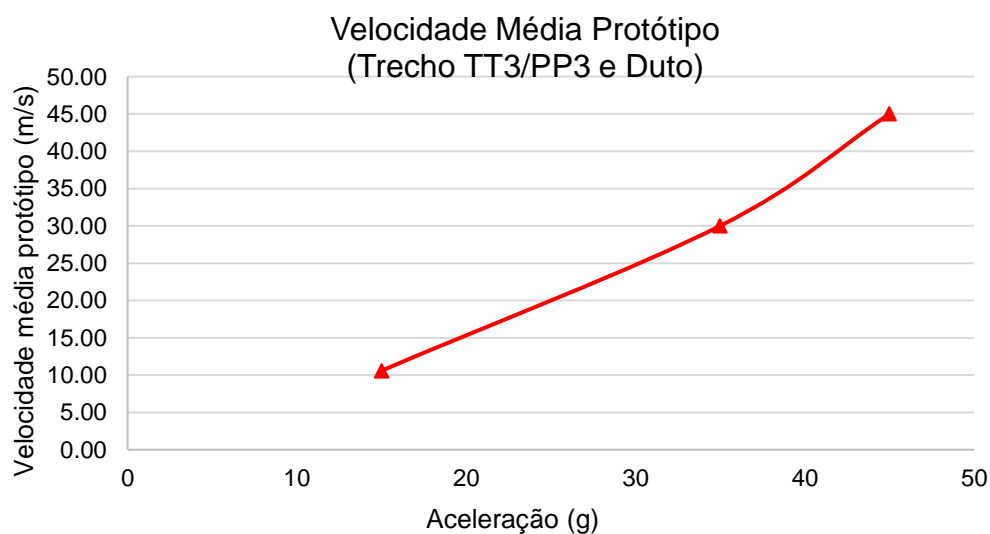
Os Gráficos 15 e 16 demonstram as velocidades médias alcançadas nos três ensaios para o modelo e para o protótipo, respectivamente.

Gráfico 15 - Velocidade média no modelo para os ensaios de 15g, 35g e 45g



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 16 - velocidade média no protótipo para os ensaios de 15g, 35g e 45g



Fonte: Autoria própria (2022)

O comportamento das velocidades médias ao longo de todo percurso do fluxo pela rampa foi verificado e as velocidades variam de acordo com os níveis g de cada ensaio e aumentam a medida que a aceleração induzida aumenta.

A Tabela 12 contém as informações pertinentes ao trecho citado acima para as velocidades no modelo e no protótipo para os três ensaios.

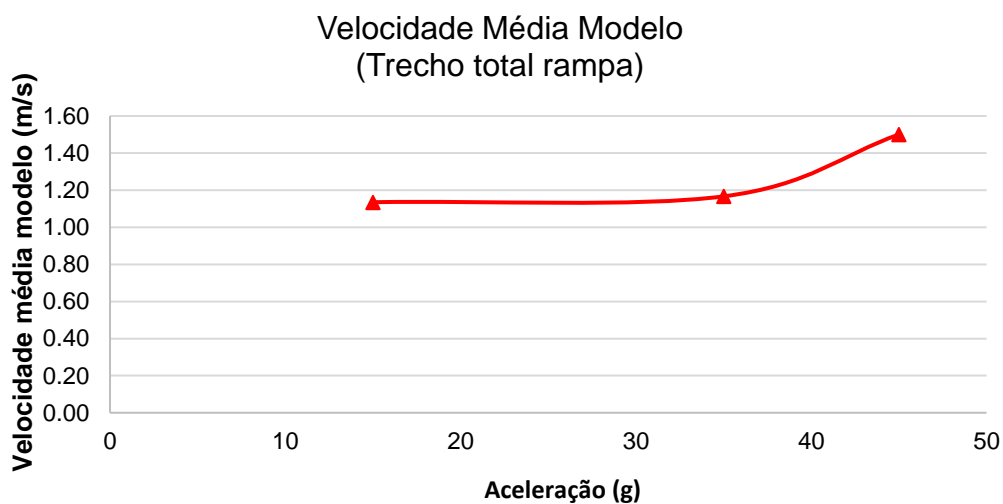
**Tabela 12 - Velocidade média deslocamento total do fluxo durante o ensaio**

TRECHO TOTAL DA RAMPA						
ENSAIO (g)	Deslocamento modelo $\Delta s$ (m)	Deslocamento protótipo $\Delta s_p$ (m)	Tempo modelo $\Delta t$ (s)	Tempo protótipo $\Delta t_p$ (s)	Velocidade média modelo $V_m$ (m/s)	Velocidade média protótipo $V_m$ (m/s)
15	0,21	742,5	0,185	41,625	1,14	17,84
35	0,21	9432,5	0,18	220,5	1,17	42,78
45	0,21	20047,5	0,14	283,5	1,50	70,71

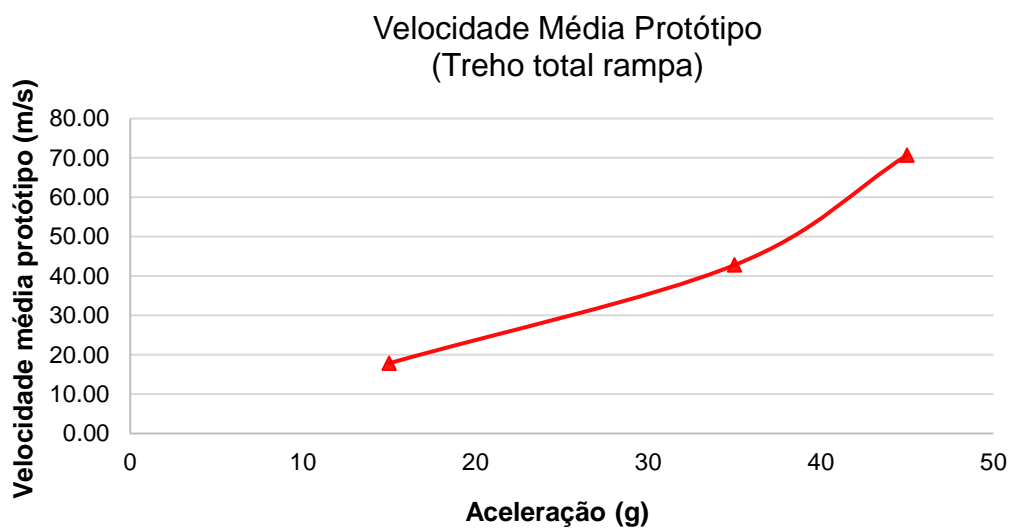
Fonte: Autoria própria (2022)

Os Gráficos 17 e 18 demonstram as velocidades médias alcançadas nos três ensaios para o modelo e para o protótipo, respectivamente.

**Gráfico 17 - Velocidade média no modelo para os ensaios de 15g, 35g e 45g**

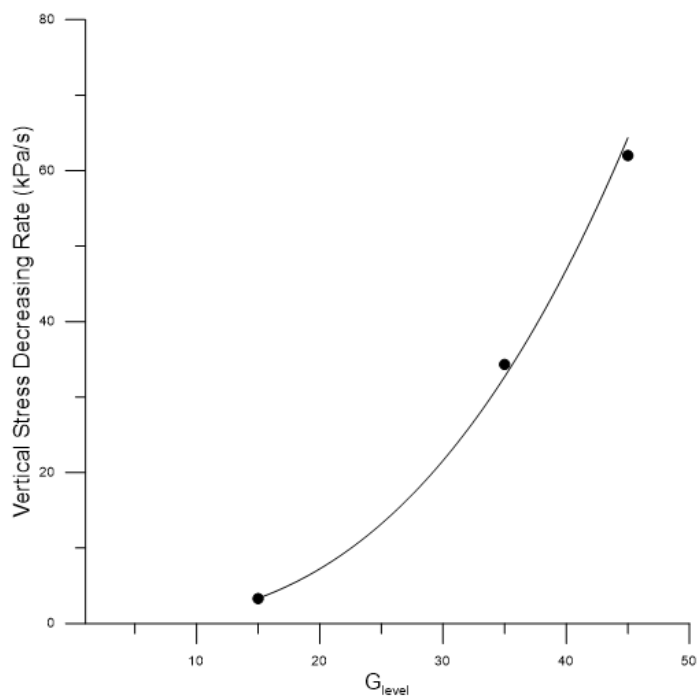


Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 18 - velocidade média no protótipo para os ensaios de 15g, 35g e 45g**

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 34 representa a velocidade de descida do fluxo dentro da caixa (esvaziamento da caixa) em função da aceleração.

**Figura 34 - Acréscimo de tensão nos ensaios de 15g, 35g e 45g**

Fonte: Autoria própria (2022)



## 5 CONCLUSÕES

A presente dissertação realizou simulações de deslizamento submarino por meio de uma centrífuga geotécnica, visando compreender o comportamento dos fluxos e os efeitos de escala associados a esses fenômenos. O objetivo principal foi correlacionar o efeito escala com as variações na indução de diferentes gravidades, utilizando o modelo reduzido como técnica e um programa experimental que trouxe contribuições positivas em relação a questões levantadas por outros autores.

Os ensaios T-bar corroboraram resultados teorizados por autores como Sahdi *et al.* (2014), mostrando um comportamento satisfatório e em conformidade com as expectativas para um solo mole e pouco adensado.

Ao aplicar as leis de escala pertinentes à força de impacto para o modelo e o protótipo, foi possível estimar a influência direta da aceleração da gravidade na distribuição de tensões. Confirmou-se que quanto maior a aceleração da gravidade, maior a tensão no material e, conseqüentemente, maior a força de impacto. As tensões totais, representadas apenas pelo peso próprio, sofreram influência direta da indução da gravidade, o que justifica seu aumento. O mesmo pode ser observado para a velocidade de escoamento da matéria e a vazão.

Em relação ao comportamento do fluxo, com base nas correlações propostas por Mohrig, Elverhoi e Parker (1999) não foi possível confirmar que houve aquaplanagem nos ensaios realizados. Os ensaios apresentam baixos coeficientes de arrasto e números de Reynolds mais elevados, indicando um fluxo com baixa resistência ao meio fluido e, portanto, alcançando maiores velocidades.

Os ensaios realizados demonstraram uma variação na velocidade conforme os diferentes níveis de aceleração gravitacional induzidos, sugerindo que forças adicionais de um nível de gravitacional mais alto impulsionam o material para um fluxo com maior velocidade.

Para futuros trabalhos, sugere-se a utilização de modelagem numérica para confrontar os resultados obtidos neste estudo e identifica possíveis correções ou aprimoramentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barker, H. R. **Physical Modelling of Construction Processes in the MiniDrum Centrifuge**. 1988. PhD thesis - University of Cambridge, United Kingdom.
- Boukpeti, N. et al., (2012). **Strength of Fine-grained Soils at the Solid–fluid Transition**. *Géotechnique*, v. 62, n. 3, p. 213 – 226.
- Breien, H.; Pagliardi, M.; Elverhoi, A.; De Blasio, F.V.; ISSLER, D. (2007). **Experimental Studies of Subaqueous vs. Subaerial Debris Flows Velocity Characteristics as a Function of the Ambient Fluid**.
- Bruton, D. A. S. et al., (2008). Pipe-Soil Interaction with Flowlines During Lateral Buckling and Pipeline Walking - The SAFEBUCK JIP, **Offshore Technology Conference**, OTC 19589.
- Costa, A. M.; Amaral, C. S.; Kowsmann, R. O. **Geotechnical-geological appraisal of the Marlin Submarine Slope**. In: International Symposium on Landslides. Anais, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- Coussot, P. (1997). **Mudflow Rheology and Dynamics**, IAHR Mono- graph Series. Rotterdam: A. A. Balkema, p. 1 – 56.
- D'ávila, R.S.F.; Arienti, L.M.; Aragão, M.A.N.; Vesely, F.F.; Santos, S.F.; Voelcker, H.E.; Viana, A.R., Kowsmann, R.O.; Moreira, J.L.P.; Coura, A.P.P.; Paim, P.S.G.; Matos, R.S.; Machado, L.C.R. (2008). **Ambientes de Sedimentação Siliciclástica de Brasil. Ambientes Marinhos Profundos: Sistemas Turbidíticos**. Editora Beca. p. 244 – 3001.
- Elger, J.; Berndt, C.; Rüpke, L.; Krastel, S.; Felix, G.; Geissler, W.H. (2018). **Falhas no Declive do Submarino Devido à Formação da Estrutura do Tubo**. *Nat Commun* 9 (1): 715. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03176-1>
- Ferreira, J.M.A., (2020). **Modelagem Centrífuga de Deslizamentos Submarinos com Diferentes Velocidades e Análise de Seu Impacto em Duto**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ.
- Gue, C. S. (2012). **Submarine Landslide Flows Simulation Through Centrifuge Modelling**. PhD Thesis. University of Cambridge, UK.
- Guo, X.; Nian, T.; Stoesser, T. (2022). **Using dimpled-pipe surface to reduce submarine landslide impact forces on pipelines at different span heights**. *Ocean Engineering*, v. 244, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110343>.
- Hampton, M. A.; Lee, H. J.; Locat, J. Submarine Landslides. **Reviews of Geophysics**, v. 34, p. 33-59, 1996.

Hance, J. J. **Development of a Database and Assessment of Seafloor Slope Stability based on Published Literature.** (Dissertação Mestrado) - University of Texas, Austin. p. 1 – 269. 2003.

Hotta, M. M. (2019). **Estudos de Fluxo de Detritos Submarinos Através de Métodos Experimentais, Analíticos e Numéricos.** (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ.

Ilstad, T; Marr; Elverhoi; Harbitz, B. (2004). **On the Dynamics and Morphology of Submarine Debris Flows.** University of Oslo.

Jolly, R.J.H.; Lonergan, L. (2002). **Mecanismos e Controles Sobre a Formação de Intrusões de Areia.** Journal of the Geological Society. 159 (5): 605–617. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-025>

Kneller, B. C.; Buckee, C.M. **The Structure and Fluid Mechanics Of Suspension Currents; A Review Of Some Recent Studies And Their Geological Implications.** *Sedimentology*, 47, Supplement 1, 2000, p. 62 – 94.

Locat, J.; Lee, H. J. (2002). **Submarine Landslides: advances and challenges.** Canadian Geotechnical Journal, v. 39, n. 1, p. 193–212.

Lopes, F. **Fenômenos de Transporte I.** Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica Departamento de Engenharia Química. p. 1 – 10. 2008.

Lykousis V.; Sakellariou, D.; Locat, J. **Submarine Mass Movements and their Consequences Advances in Natural and Technological Hazards Research.** v.27, p.101-110.

Madabhushi, G. **Centrifuge Modelling for Civil Engineers.** Boca Ratón, Florida, USA: CRC Press/Taylor & Francis, 2015.

Manica, R. **Geração de Correntes de Turbidez de Alta Densidade: Condicionantes Hidráulicos e Depositionais.** 2009. p. 1 – 391. (Tese Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande, Porto Alegre.

Pardo, E. A. A., (2015). **Simulação de Instabilidade de Taludes Submarinos Usando Modelagem Centrífuga.** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.

Prior, D. B.; Coleman, J. K. **Slope Instability. In: Submarine Slope Instability.** New York: W. Sons. 1984.

Sahdi, F.; Gaudin, C.; White, D. J.; Boylan, N. (2014). **Interpreting T-bar tests in ultra-soft clay.** International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 14(1), p. 13-19.

SANTOS, T. M. F. B., (2018). **Modelagem centrífuga de duto sujeito a impacto de deslizamento submarino.** (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ.

Shanmugam, G. **50 years of the turbidite paradigm 1950s-1990s. Deep-water processes and facies models: a critical perspective.** Marine and Petroleum Geology, v. 17, p. 285-342, 2000.

Silva, B. A. **Análise de estabilidade de taludes ao longo da rota de um duto.** 2005. (Dissertação Mestrado) -Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. p. 1 – 117.

Simpson, J. E. **Gravity Currents in The Environment and The Laboratory.** 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 1 – 244.

Taylor, R. N. **Geotechnical centrifuge technology.** Londres: R. N. Taylor, 1995, p. 1 – 296.

TERRILE, E. et al., (2018). **Evaluation of Debris Flow Impact on Submarine Pipelines: A Methodology.** Offshore Technology Conference, OTC 28847-MS.

Terzaghi, K., (1956). **Varieties of Submarine Slope Failure.** Proceedings of the 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, University of Texas, Austin, Bureau of Engineering Research, Special Publication No. 29, 1956. p. 1- 41.

Van Wazer, J. R.; Lyons, J.W.; Kim, K.Y.; Colwell, R.E. **Viscosity and Flow Measurement: a laboratory handbook of rheology.** New York: Interscience Publisher, 1966, p. 1 – 406.

Yin, M.; Rul, Y.; Xue, Y. (2017). **Centrifuge study on the runout distance of submarine debris flows.** Marine Georesources & Geotechnology, v. 37(3), p. 301-311.

Zakeri, A.; Chi, K.; Hawlader, B. (2011). **Centrifuge Modeling of Glide Block and Out-runner Block Impact on Submarine Pipelines.** Offshore Technology Conference, OTC 21256. p. 12–14.

Zakeri, A.; Hawlader, B.; Chi, K., (2012). **Drag forces caused by submarine glide block or out-runner block impact on suspended (free-span) pipelines.** Ocean Engineering, v. 47, p. 50–57.

## ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CAULIM



**UENF**

Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Laboratório de Engenharia Civil  
LECIV/ CCT

### Resultados de Ensaio de Caracterização Completa

Interessado: Tibana

Data: 31/3/21

Obra: -

Ensaio: 01

Furo: -

Amostra: Caulim

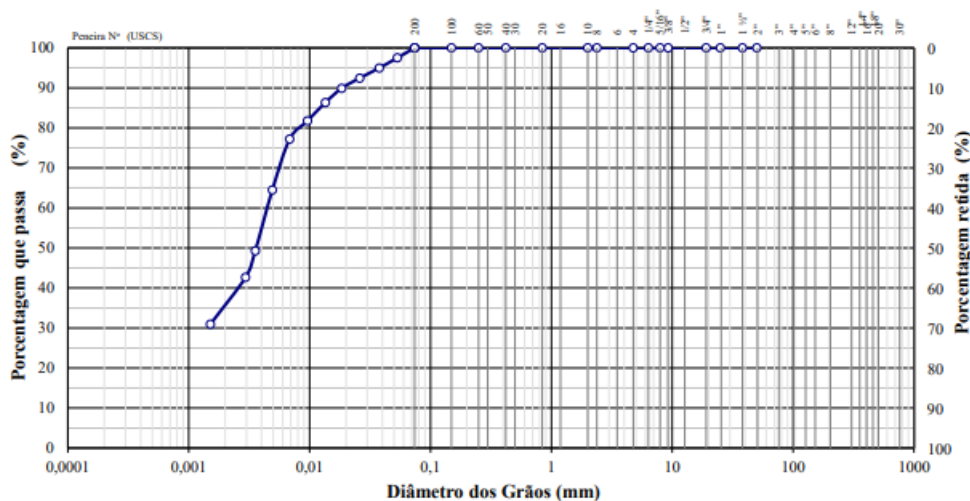
#### Características Granulométricas Equivalentes

##### Frações Granulométricas e Classificação Unificada, Equivalentes

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	-	-	-	1,7	63,4	34,9	CL

##### Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D <sub>10</sub>	D <sub>15</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>85</sub>	Cc	Cu



	Argila	Silte	Areia			Pedregulho			Pedra	Matacão
AINT			grossa	média	fina	grossa	média	fina		
USCS	Argila	Silte	Areia			Pedregulho				
MIT	Argila	Silte	Areia			Pedregulho				

#### Propriedades Físicas

##### Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,39 g/cm<sup>3</sup>

##### Umidades:

Umidade Natural = 8,8 %  
Umidade higroscópica = 1,1 %

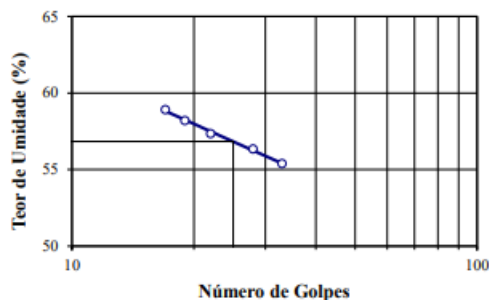
##### Índices de Atterberg:

Limite de Liquidez = 56,8 %  
Limite de Plasticidade = 27,7 %  
Índice de Plasticidade = 29,1 %  
Índice de Consistência = - %

##### Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 0,83

##### Limite de Liquidez



## ANEXO II – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO METACAILIM



**UENF**  
Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Laboratório de Engenharia Civil  
LECIV/ CCT

### Resultados de Ensaio de Caracterização Completa

Interessado: Tibana  
Obra: -  
Furo: -

Data: 31/3/21  
Ensaio: 02  
Amostra: Meta caulim

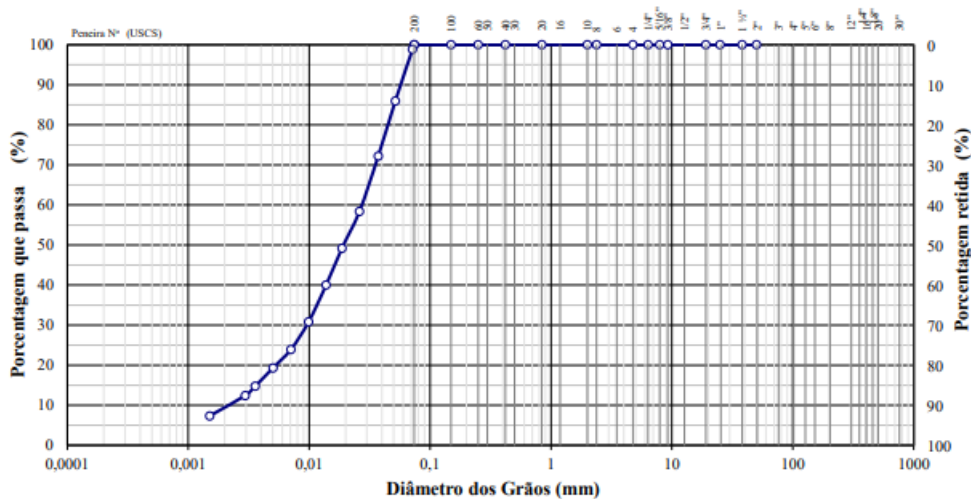
#### Características Granulométricas Equivalentes

##### Frações Granulométricas e Classificação Unificada, Equivalentes

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	-	-	-	8,6	82,3	9,1	-

##### Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D <sub>10</sub>	D <sub>15</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>85</sub>	Cc	Cu
-	-	-	-	-	-	-	-



ABNT	Argila		Silte		Areia			Pedregulho			Pedra	Matacão
	fin	grossa	fin	grossa	fin	méd	grossa	fin	méd	grossa		
USCS	Argila		Silte		Areia			Pedregulho				
MIT	Argila		Silte		Areia			Pedregulho				

#### Propriedades Físicas

##### Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,49 g/cm<sup>3</sup>

##### Umidades:

Umidade Natural = 8,8 %  
Umidade higroscópica = 0,8 %

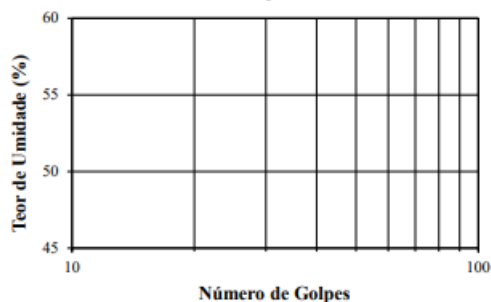
##### Índices de Atterberg:

Limite de Liquidez = %  
Limite de Plasticidade = %  
Índice de Plasticidade = %  
Índice de Consistência = - %

##### Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 0,00

##### Limite de Liquidez



## ANEXO III – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA MISTURA



**UENF**

Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Laboratório de Engenharia Civil

LECIV/ CCT

### Resultados de Ensaio de Caracterização Completa

Interessado: Tibana

Data: 31/3/21

Obra: -

Ensaio: 02

Furo: -

Amostra: Caulim/meta caulim

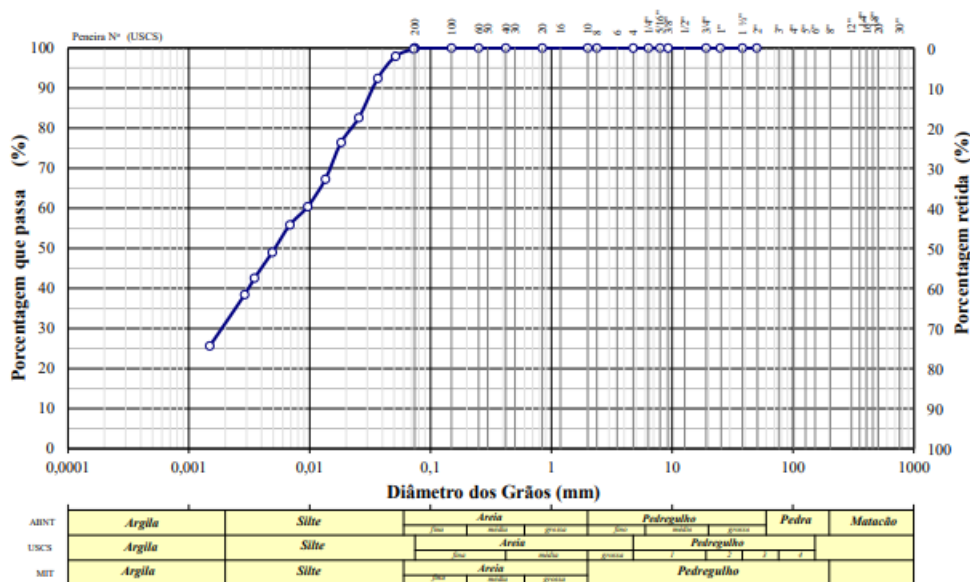
#### Características Granulométricas Equivalentes

##### Frações Granulométricas e Classificação Unificada, Equivalentes

Pedregulho			Areia		Silte	Argila	Classificação (USCS)	
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média				
-	-	-	-	-	1,3	68,4	30,3	-

##### Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D <sub>10</sub>	D <sub>15</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>85</sub>	C <sub>c</sub>	C <sub>u</sub>
-	-	-	-	-	-	-	-



#### Propriedades Físicas

##### Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,44 g/cm<sup>3</sup>

##### Umidades:

Umidade Natural = 8,8 %

Umidade higroscópica = 0,8 %

##### Índices de Atterberg:

Limite de Liquidez = %

Limite de Plasticidade = %

Índice de Plasticidade = %

Índice de Consistência = - %

##### Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 0,00

##### Limite de Liquidez

