



## MODELAGEM CENTRÍFUGA DE FLUXOS DE DETRITOS SUBMARINOS

Deise Trevizan Pelissaro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Márcio de Souza Soares de Almeida  
Diego de Freitas Fagundes

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2018

MODELAGEM CENTRÍFUGA DE FLUXOS DE DETRITOS SUBMARINOS

Deise Trevizan Pelissaro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida, Ph.D.

---

Prof. Diego de Freitas Fagundes, D.Sc.

---

Prof. Sergio Tibana, D.Sc.

---

Prof.<sup>a</sup> Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
FEVEREIRO DE 2018

Pelissaro, Deise Trevizan

Modelagem centrífuga de fluxos de detritos submarinos/ Deise Trevizan Pelissaro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIV, 107 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Márcio de Souza Soares de Almeida

Diego de Freitas Fagundes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 91-97.

1. Fluxo de detritos submarino. 2. Centrífuga Geotécnica. 3. Modelagem Física. 4. Velocimetria por imagem de partículas. I. Almeida, Márcio de Souza Soares de *et al.*, II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## DEDICATÓRIA

À minha família.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que me permitiu alcançar este objetivo na minha vida. Aos meus pais que, desde que sempre me apoiaram em minhas escolhas, incentivando-me a correr atrás daquilo que almejo. Não menos importante, não poderia deixar de agradecer a minha irmã Fernanda que, apesar da distância, sempre esteve presente e disposta a me escutar nas horas mais difíceis.

Ao Professor Marcio pela orientação deste trabalho e pelos conhecimentos transmitidos durante minha vida acadêmica. Ao Professor Diego, por me apresentar ao mundo da Geotecnia, pelas orientações e conselhos.

Ao colega de trabalho Marcelo, nada desse trabalho seria possível sem seu apoio, tanto em forma de conhecimento como por tornar a rotina de laboratório mais leve. Nesse sentido quero agradecer também a equipe maravilhosa que formamos com Iago e Mayara.

A todos do laboratório de que de certa forma me ajudaram, tanto no âmbito técnico como pela amizade.

A todas as amigas que conquistei durante esse período e que foram fundamentais para a conclusão dessa etapa. Fica meu agradecimento especial a Carine que mais que minha amiga foi minha família no Rio.

A todos que de alguma forma incentivaram e contribuíram para este trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## MODELAGEM CENTRÍFUGA DE FLUXOS DE DETRITOS SUBMARINOS

Deise Trevizan Pelissaro

Fevereiro/2018

Orientadores: Márcio de Souza Soares de Almeida

Diego de Freitas Fagundes

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta um estudo de fluxos de detritos submarinos em taludes de suave inclinação (cinco graus). As simulações foram efetuadas em uma centrífuga geotécnica de tambor ( $N = 40$ ) com o objetivo de determinar o perfil de velocidades para fluxos de detritos submarinos com a ocorrência do fenômeno de aquaplanagem. Diversas alterações foram implementadas na centrífuga de tambor existente na COPPE. Citam-se a utilização de praticamente todo o seu perímetro, o uso de uma rampa rugosa curva instrumentada e adequadamente vedada, e coleta de imagens e instrumentação em 4 posições do modelo. Nas simulações de fluxos de detritos submarinos variou-se o teor de umidade da mistura, medindo-se de antemão para cada uma delas os valores de viscosidade e de tensão de escoamento. Outra variável estudada foi a pressão de lançamento das misturas dentro da centrífuga. Foram obtidos resultados de tensão total e de poropressão ao longo do tempo e de imagens de vídeo. Usou-se a técnica de velocimetria por imagem de partículas para a obtenção de perfis de velocidades. Todos estes resultados permitiram indicar os ensaios com ocorrência de aquaplanagem. Nestes casos observou-se intrusão de uma camada fina de água entre a lama escorregada e o leito do talude, evidenciada também com o perfil de velocidades medidas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## CENTRIFUGE MODELLING OF SUBMARINE DEBRIS FLOW

Deise Trevizan Pelissaro

February/2018

Advisors: Márcio de Souza Soares de Almeida

Diego de Freitas Fagundes

Department: Civil Engineering

This work presents a study of submarine debris flows in a gentle slope (5 degrees angle). The simulations were performed in a geotechnical drum centrifuge ( $N = 40$ ) with the objective of determining the velocity profile for underwater debris flows with the occurrence of the aquaplaning phenomenon. Several changes were implemented in the existing COPPE drum centrifuge. The use of practically all of its perimeter, the use of a rugged ramp, instrumented curve and adequately sealed ramp, and collection of images and instrumentation in 4 positions of the model. In the simulations of underwater debris flows the moisture content of the mixture was varied by measuring the viscosity and yield stress values for each mixture. Another variable studied was the released pressure of the mixtures inside the centrifuge. Results of total stress and porepressure over time and of video images were obtained. The particle image velocimetry technique was used to obtain velocity profiles. All these results allowed to indicate the tests with occurrence of aquaplaning. In these cases an intrusion of a thin layer of water was observed between the slipped mud and the slope bed also observed with the measured velocity profile.

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA	1
1.2	ESTRUTURA DO PROJETO DE PESQUISA	2
1.3	OBJETIVOS GERAIS	4
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
2.1	GEORISCOS SUBMARINOS	6
2.2	MECANISMOS DE RUPTURA	7
2.2.1	Terremotos	8
2.2.2	Ondas do oceano	8
2.2.3	Atividades humanas	9
2.3	DESLIZAMENTOS SUBMARINOS	10
2.4	CLASSIFICAÇÃO DOS DESLIZAMENTOS SUBMARINOS	11
2.5	FASES DO FLUXO DE DETRITOS	12
2.6	AQUAPLANAGEM	13
2.6.1	Condições para a ocorrência de aquaplanagem	14
2.7	VELOCIDADES AO LONGO DO FLUXO DE DETRITOS	18
2.8	ESTUDOS EXPERIMENTAIS EM FLUXO DE DETRITOS SUBMARINOS	23
2.8.1	Experimentos em ambiente 1g	24
2.8.2	Experimentos envolvendo modelagem centrífuga	25
2.9	MODELAGEM CENTRÍFUGA	28
2.9.1	Leis de escala convencionais	29
2.9.2	Modelagem centrífuga de um <i>debris flow</i>	30
2.10	VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS	32
2.10.1	Escolha do software	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>38</b>
3.1	CONCEPÇÃO GERAL DO ENSAIO	38
3.2	SOLO UTILIZADO	38
3.3	APARATO EXPERIMENTAL DA MODELAGEM CENTRÍFUGA	41
3.3.1	Centrífuga de tambor da COPPE	41
3.3.2	Canal de amostras	41
3.3.3	Procedimento de lançamento da lama	44



3.4	INSTRUMENTAÇÃO.....	47
3.4.1	Transdutores de tensão total e poropressão.....	47
3.4.2	Saturação e calibração dos transdutores em voo.....	48
3.4.3	Câmeras.....	50
3.4.4	Textura Rastreável.....	51
3.4.5	Validação do software PIV.....	52
3.5	ILUMINAÇÃO.....	53
3.6	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	54
3.7	PROGRAMA DE ENSAIOS.....	55
3.8	METODOLOGIA.....	56
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>58</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	58
4.2	IMAGENS E MEDIDAS DE POROPRESSÃO E TENSÃO TOTAL.....	59
4.2.1	Considerações preliminares.....	59
4.2.2	Ensaio com $w = 90\%$ .....	61
4.2.3	Ensaio com $w = 100\%$ .....	67
4.2.4	Ensaio com $w = 85\%$ e avaliação da influência da variação da umidade.....	70
4.3	PERFIS DE VELOCIDADES HORIZONTAIS FRONTAIS.....	73
4.3.1	Considerações preliminares.....	73
4.3.2	Ensaio sem ocorrência de aquaplanagem.....	74
4.3.3	Ensaio com possível ocorrência de aquaplanagem.....	78
4.3.4	Ensaio com ocorrência de aquaplanagem.....	80
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>87</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	87
5.1.1	Modelagem física em centrífuga e aparato experimental.....	87
5.1.2	O fenômeno da aquaplanagem.....	88
5.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	89
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO 01 - CALIBRAÇÃO EM VÔO DOS TRANSDUTORES DE POROPRESSÃO E TENSÃO TOTAL.....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO 02 - PARÂMETROS REOLÓGICOS.....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Vertentes do projeto de pesquisa .....	3
Figura 2.1 – Taludes Submarinos (adaptado de GUE, 2012).....	10
Figura 2.2 – Transições de um escorregamento submarino (adaptado de WHITE <i>et al.</i> , 2008).....	11
Figura 2.3 – Tipos de instabilidade de taludes (adaptado de PRIOR, 1984) .....	12
Figura 2.4 – Possíveis condições de contorno para deslizamentos submarinos (adaptado de LOCAT e LEE, 2000) .....	13
Figura 2.5 – Pressão do fluido e pressão do fluxo de detritos gerados na parte frontal do deslizamento (Adaptado de HANCE, 2003) .....	14
Figura 2.6 – Formação da cabeça de fluxo (a) Não ocorre aquaplanagem na cabeça do fluxo, (b) Fluxo de detritos na à beira de aquaplanagem, (c) Aquaplanagem onde uma camada de fluídos é observada abaixo da cabeça (Adaptado de MOHRIG, 1999) .....	16
Figura 2.7 – Esquema das três principais situações do comportamento da tensão total e poropressão (adaptado de ILSTAD <i>et al.</i> , 2004) .....	17
Figura 2.8 – Velocidade média ao longo do tempo em quatro diferentes posições para fluxos submarinos (adaptado de BREIEN <i>et al.</i> , 2007).....	19
Figura 2.9 – Velocidade média ao longo do tempo em quatro diferentes posições para fluxos subaéreos (adaptado de BREIEN <i>et al.</i> , 2007) .....	19
Figura 2.10 – Exemplos da distribuição da velocidade média em x para os casos: (a) fluxo subaéreo com 5% argila, 67% de areia e 28% de água; (b) fluxo submarino com 20% de argila, 52% de areia e 28% de água (adaptado de BREIEN <i>et al.</i> , 2007).....	20
Figura 2.11 – Perfil de velocidade para fluxos subaéreo e submarino (adaptado de BREIEN <i>et al.</i> , 2007).....	21
Figura 2.12 – Características obtidas para um fluxo rico em argila (a)Vistas laterais; (b) Vetores de velocidade instantâneos; (c) Perfis de velocidade vertical e horizontal (adaptado de ELVERHØI <i>et al.</i> , 2005) .....	22
Figura 2.13 – Aspecto do fluxo submarino rico em areia (adaptado de ELVERHØI <i>et al.</i> , 2005).....	23
Figura 2.14 - Correspondência entre a tensão inercial em um modelo e a tensão gravitacional no protótipo (SCHOFIELD, 1980).....	29
Figura 2.15 – Manipulação das imagens durante a análise PIV (adaptado de WHITE, 2003).....	33

Figura 2.16 – Avaliação do vetor de deslocamento no plano de correlação $Rn(s)$ (WHITE <i>et al.</i> 2003) .....	34
Figura 2.17 – Avaliação dos três programas PIV em um corpo de prova (MORALES <i>et al.</i> , 2014).....	36
Figura 2.18 – Imagens de três corpos de prova processados no PIVLab (a) sem textura, (b) marcas no centro da amostra, (c) pontos por toda amostra (MORALES <i>et al.</i> , 2014) .....	36
Figura 3.1 - Variação da tensão de escoamento em função do índice de liquidez para duas amostras do caulim inicialmente utilizado .....	39
Figura 3.2 - Curva granulométrica do solo artificial utilizado (FERNANDES, 2018) .....	40
Figura 3.3 – (a) Projeto inicial do canal de amostras; (b) Canal de amostras com rampa em EPS.....	42
Figura 3.4 – (a) Projeto da vista superior da caixa de ensaios; (b) Vista superior da caixa de ensaios .....	43
Figura 3.5 – Caixa de ensaios e caixa de contrapeso .....	44
Figura 3.6 – Funil de alimentação .....	44
Figura 3.7 - Sistema de lançamento de lama utilizando pressão externa .....	45
Figura 3.8 –Válvula solenoide: (a) plástica; (b) metálica .....	46
Figura 3.9 –Visão geral da montagem do aparato experimental .....	46
Figura 3.10 – Transdutores de poropressão e tensão total .....	47
Figura 3.11 - Posicionamento das linhas de instrumentação: (a) vista lateral (b) vista superior.....	48
Figura 3.12 - Coluna d' água pigmentada utilizada na calibração .....	49
Figura 3.13 - Curva de calibração do sensor CTT1 .....	50
Figura 3.14 – Câmera utilizada no monitoramento do ensaio .....	50
Figura 3.15 – Imagens com e sem distorção .....	51
Figura 3.16 – Aspecto da mistura teste (solo + partículas traçadoras) .....	52
Figura 3.17 – Resultados da análise no software PIV .....	53
Figura 3.18 – Sistema de iluminação no interior da centrífuga.....	54
Figura 3.19 – Sistema de aquisição de dados.....	55
Figura 3.20 - Esquema da nomenclatura adotada .....	56
Figura 4.1 - Exemplo do comportamento dos transdutores (a) durante toda aquisição de dados (b) após $t = 60$ s .....	60
Figura 4.2 - Comportamento dos transdutores na Posição 3 .....	61
Figura 4.3 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w90_p1.1 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	62

Figura 4.4 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w90_p0.9 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	64
Figura 4.5 - Semelhança de comportamento do fluxo de detritos do Ensaio w90_p0.9 e do apresentado na literatura por ILSTAD <i>et al.</i> (2004) .....	65
Figura 4.6 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w90_p0.8 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	66
Figura 4.7 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w100_p1.0 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	68
Figura 4.8 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w100_p0.8 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	69
Figura 4.9 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w85_p1.1 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	71
Figura 4.10 - Resultado da análise PIV para o ensaio w90_p0.8 .....	73
Figura 4.11 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w100_p1.0 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	75
Figura 4.12 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w100_p0.8 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	76
Figura 4.13 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w85_p1.1 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	78
Figura 4.14 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w90_p1.1 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	79
Figura 4.15 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w90_p0.9 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	81
Figura 4.16 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w90_p0.8 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3 .....	82
Figura 4.17 - Perfil teórico para fluxos de detritos submarinos com ocorrência de aquaplanagem .....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Possíveis mecanismos desencadeadores de deslizamentos submarinos (adaptado de LOCAT e LEE, 2002).....	8
Tabela 2.2 –Números densimétricos de Froude calculados com base em.....	17
Tabela 2.3 – Configurações dos ensaios realizados por PARDO (2015) .....	26
Tabela 2.4 – Resumo dos resultados obtidos para a determinação da aquaplanagem (PARDO, 2015) .....	27
Tabela 2.5 – Leis de escala convencionais para modelagem centrífuga (adaptado de STEWART, 1992) .....	30
Tabela 2.6 – Leis de escala para modelagem centrífuga de fluxo de detritos (GUE, 2012).....	32
Tabela 2.7 – Resumo dos resultados da avaliação dos softwares de PIV (adaptado de MORALES <i>et al.</i> , 2014).....	37
Tabela 3.1 - Comparação das propriedades físicas do caulim <i>Speswhite</i> (FERNANDES <i>et. al.</i> , 2017) .....	39
Tabela 3.2 - Leituras dos sensores durante a calibração .....	49
Tabela 3.3 - Características das misturas utilizadas em cada ensaio .....	56
Tabela 4.1 - Características dos ensaios e das misturas estudadas .....	58
Tabela 4.2 - Resumo dos resultados obtidos .....	83

## LISTA DE SÍMBOLOS

$p_f$	Pressão de estagnação do fluido
$\rho_w$	Densidade da massa de água
$v_f$	Velocidade frontal do fluxo
$\rho_d$	Densidade do solo
$h_a$	Espessura média do deslizamento
$\beta$	Ângulo de inclinação do talude
$g$	Aceleração da gravidade
$\bar{v}_x$	Velocidade média
$F_{rd}$	Número densimétrico de Froude
R	Raio da centrífuga
$t$	Tempo
$w$	Umidade
$\omega_L$	Limite de liquidez
$\omega_P$	Limite de plasticidade
$I_P$	Índice de plasticidade
$V_m$	Velocidade do modelo
$V_p$	Velocidade do protótipo
N	Nível de aceleração g

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Deslizamentos de terra podem ocorrer tanto em ambiente terrestre quanto em aquático, sendo os primeiros denominados de subaéreos e os segundos de submarinos. A ocorrência de deslizamentos submarinos compromete a integridade de dutos e equipamentos em ambiente marinho de forma que é importante definir as regiões e condições para o acontecimento de deslizamentos submarinos e/ou evitar utilizar estas áreas de risco. Esses eventos ainda não são bem compreendidos, uma vez que segundo ANDRESEN e BJERRUM (1967) os mesmos ocorrem em inclinações que são consideradas estáveis em análises convencionais de estabilidade de taludes. Outras características que os deslizamentos submarinos apresentam são grandes volumes de solo movimentado e longas distâncias percorridas. Na Noruega, por exemplo, datações de carbono do material recuperado de sedimentos fornecem informações de que o deslizamento de Storegga envolveu um volume de solo de aproximadamente 2500 km<sup>3</sup> e percorreu uma distância de 800 km (BRYN *et al.*, 2002). Apesar de apresentar inclinações suaves, a distância percorrida pelos sedimentos é ainda maior quando uma fina camada de água se introduz entre o leito marinho e o volume de solo transportado. Este fenômeno estudado primeiramente por MOHRING *et al.* (1998) é denominado de aquaplanagem e entender as variáveis que promovem a sua ocorrência é um grande desafio da engenharia *offshore*.

O estudo do campo de velocidades ao longo do fluxo de detritos também se mostra relevante na definição das regiões de risco para instalação de estruturas *offshore*. Para a determinação do mesmo a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV) é uma ferramenta bastante precisa, como mostra WHITE *et al.* (2003) em seu trabalho de desenvolvimento do primeiro *software* de PIV para área de Geotecnia.

Além disso, após a ruptura do talude submarino o material escorregado se mistura interagindo com a água do ambiente tornando-se então um *debris flow*, o qual possui resistência e viscosidade variáveis ao longo do fluxo. O *debris flow* apresenta inicialmente propriedades muito similares ao solo que lhe deu origem. No entanto, a medida que o evento evolui ele se torna um fluido viscoso, de modo que para a compreensão de tal fenômeno se faz necessário o conhecimento das propriedades reológicas do solo.

A ocorrência de deslizamentos submarinos está associada principalmente à deposição rápida de sedimentos, processos de erosão e sedimentação, atividades sísmicas, efeitos de onda, aumento de poropressão na massa de solo causado por carregamento e deformações, entre outros fatores. Nesse sentido a costa brasileira, em particular as bacias de Santos e Campos, possui um histórico significativo de sismos de baixa e média intensidade e atualmente é um local constantemente utilizado para instalação de estruturas *offshore* para a extração de petróleo no pré-sal.

## 1.2 ESTRUTURA DO PROJETO DE PESQUISA

Modelos de solo podem ser acelerados em uma centrífuga de modo a serem submetidos a um campo inercial de aceleração radial que, desde que o modelo seja coerente, simula o campo gravitacional terrestre, porém muitas vezes maior (SCHOFIELD, 1980). No caso de simulação de corrida de detritos em ambiente aquático a centrífuga geotécnica é uma ferramenta muito útil que permite simular as condições reais deste fenômeno de forma prática e rápida. Até então a maioria dos estudos relacionados a *debris flow* foram simulados apenas em ambientes à 1g, onde é necessário utilizar grandes volumes de solo e a distância percorrida pelo fluxo se limita a alguns metros.

Desta forma, uma melhor compreensão dos aspectos associados à fluxo de detritos em ambiente aquático se faz necessário, visando uma metodologia de projeto que conduza a estruturas *offshore* otimizadas e seguras e que atendam à sua funcionalidade durante toda sua vida útil. Um importante desafio para o cenário atual é a integração da mecânica dos movimentos de massa na avaliação adequada dos riscos pertinentes a esses eventos, no desenvolvimento de recursos naturais e no estabelecimento de corredores de comunicação confiáveis.

Em virtude do estudo de *debris flow* ser complexo, a definição da abrangência do estudo é fundamental na modelagem do problema. Assim sendo, o projeto de pesquisa se divide em duas vertentes: modelagem centrífuga e estudos reológicos, as quais fornecerão dados para alimentar a modelagem numérica do fenômeno, conforme mostrado na Figura 1.1. Estas 3 vertentes são o objetivo de uma tese de doutorado que se desenvolve em paralelo à presente pesquisa, a qual se concentrará na vertente de modelagem centrífuga.



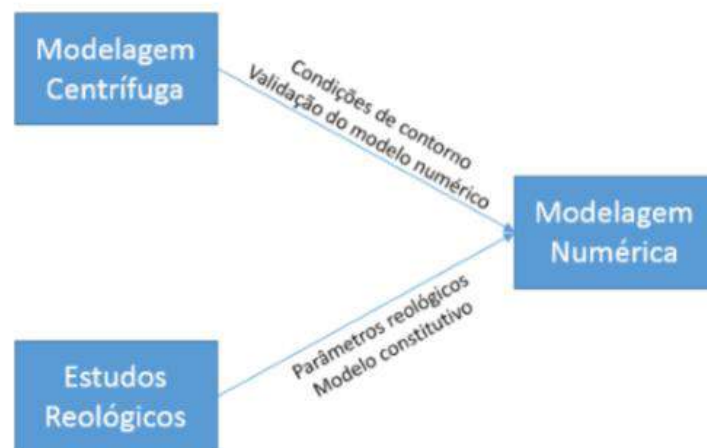


Figura 1.1 - Vertentes do projeto de pesquisa

A modelagem física consistirá em simular o momento posterior à ruptura do talude submarino, desde o início do fluxo de detritos até a disposição final do material carregado.

As propriedades reológicas do material envolvido no fluxo influenciam de forma importante o comportamento do fluxo. O estudo da reologia fornecerá então não só os parâmetros reológicos, que são fundamentais para a modelagem numérica ou até mesmo para uma solução analítica, mas também o modelo constitutivo mais adequado. Apesar desta vertente de estudo não ser o foco do presente trabalho, será abordada em uma tese de doutorado que está inserida no mesmo projeto de pesquisa. Por fim os resultados dos ensaios reológicos e centrífugos serão utilizados no desenvolvimento de um modelo numérico que preveja o comportamento de um fluxo de detritos submarino.

Este trabalho, associado a uma pesquisa de doutorado, insere-se na linha de pesquisa de Modelagem Física com centrífuga geotécnica da COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia) que, desde 1998, tem abordado os mais diversos problemas geotécnicos (ALMEIDA *et al.*, 2016). As pesquisas na área de taludes submarino em centrífuga geotécnica foram iniciadas com o trabalho de PARDO (2015). Em paralelo, com apoio da PETROBRAS, estão também em andamento três pesquisas de doutorado e uma de mestrado em tema correlato: “Instabilidade sísmica de taludes submarinos” .

### 1.3 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral desse trabalho é simular, através da modelagem física em centrífuga geotécnica de tambor, um fluxo de detritos submarino com inclinação suave para o estudo do efeito da aquaplanagem através da análise do campo vetorial de velocidades.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentro do objetivo principal, estão inseridos os seguintes objetivos específicos:

1. Configurar a mini-centrífuga de tambor de forma que possa ser utilizada para simular um fluxo de detritos submarinos, em ambiente de 40g, monitorado com câmeras e transdutores de tensão total e poro-pressão instalados no fundo do canal;
2. Observar as condições para ocorrência da aquaplanagem e buscar um melhor entendimento do fenômeno;
3. Realizar análise de imagens, através de um sistema PIV e câmeras instaladas ao longo do canal da centrífuga. Apartir dessa análise definir o campo de velocidades para fluxos de detritos com e sem ocorrência de aquaplanagem;
4. Realizar a caracterização geotécnica e o estudo reológico do material ensaiado de modo a compreender a relação entre os parâmetros reológicos e geotécnicos em um fluxo de detritos.

### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos, de acordo com as etapas de pesquisa realizadas.

A revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 2, aborda a fundamentação teórica do tema central, sendo apresentados os principais conceitos e a classificação dos deslizamentos submarinos. A modelagem centrífuga e o uso da técnica de velocimetria por imagem de partículas também serão o foco deste capítulo.

O capítulo 3 descreve o projeto de pesquisa que foi desenvolvido. São apresentadas as hipóteses de pesquisa, os materiais e equipamentos utilizados, bem como a metodologia empregada na realização dos ensaios.

O capítulo 4 consiste da apresentação e análise dos resultados das imagens do PIV e leitura dos sensores obtidos nos ensaios centrífugos de *debris flow* submarino.

Considerações finais são apresentadas no Capítulo 5, com sugestões para futuros trabalhos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem por finalidade apresentar o embasamento teórico necessário para a melhor compreensão da pesquisa que será desenvolvida. A modelagem física dos fluxos de detritos submarinos com o uso de centrífuga geotécnica é um tema ainda pouco explorado no Brasil e no mundo. As leis de escala para esse tipo de fenômeno foram propostas por GUE (2012), e desde então, no Brasil, a pesquisa tem se concentrado em estudar o fenômeno da aquaplanagem pelo Grupo de Modelagem Centrífuga da COPPE e da UENF (Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro).

### 2.1 GEORISCOS SUBMARINOS

A exploração dos recursos naturais, principalmente de petróleo e gás, associado a crescente necessidade de rotas de comunicação no mar e ao impacto das mudanças globais tornaram necessário o desenvolvimento de técnicas de topografia bem integradas no fundo do mar afim de caracterizar e prevenir os georiscos associados a movimentos de massa submarina. Nas ultimas décadas obtiveram-se significativos avanços no mapeamento e na descrição da morfologia de deslizamentos de terra. No entanto, essas técnicas ainda apresentam determinadas restrições que não permitem sua utilização em ambiente marinho e tão pouco a extrapolação dos resultados obtidos em deslizamentos terrestres para o ambiente marinho.

Os movimentos de massa marinha apresentam características muito próximas dos terrestres, porém apresentam características únicas como a geração de correntes de turbidez, as grandes distâncias percorridas e a ocorrência em taludes com ângulos muito suaves. Essas características peculiares dos deslizamentos submarinos mostram a importância de avaliar seu impacto em qualquer atividade *offshore* em áreas de grandes amplitudes.

Embora a frequência com que deslizamentos submarinos ocorrem seja menor em relação aos subaéreos (taludes *onshore*), alguns casos históricos e significativos merecem menção.

Um destes eventos é o deslizamento de Storegga que ocorreu há cerca de 8200 anos na Noruega e se desencadeou em um volume de aproximadamente 3000 km<sup>3</sup> de sedimentos afetando uma área de aproximadamente 95000 km<sup>2</sup>. Segundo TALLING (2014) este volume de solo é 300 vezes maior que o fluxo de sedimentos

anual transportado para o oceano por todos os rios do mundo e pode ser classificado como um dos maiores deslizamentos submarino do mundo.

Tsunamis são comumente gerados por terremotos aquáticos, mas podem ser resultados de deslizamentos submarinos, como é o caso do deslizamento de Storegga. Com base em um banco de dados abrangente e informações morfológicas detalhadas, HAFLIDASON *et al.* (2005) concluíram que a idade deste deslizamento coincide com a idade de um grande evento de tsunami encontrado ao longo da costa oeste da Noruega e áreas adjacentes. Ainda segundo TAPPIN *et al.* (2008), em 1999 um deslizamento com cerca de 5 km<sup>3</sup> localizado em Papua Nova Guiné provocou a morte de 2200 pessoas.

BARLEY (1999) afirma que deslizamentos submarinos são uma ameaça à infraestrutura do fundo mar, tanto fisicamente como economicamente, uma vez que podem atingir instalações de petróleo e gás que são quantificadas na ordem de dezenas de milhões de dólares. É o caso do campo de gás de Ormen Lange que oferece cerca de aproximadamente 20% do fornecimento de gás do Reino Unido e está localizado logo abaixo da cabeça do deslizamento de Storegga.

A geração de correntes de turbidez, característica particular de deslizamentos submarinos, embora menos densa que o fluxo e aparentemente menos inofensivas podem, segundo PIPER *et al.* (1999) e CARTER *et al.* (2012), destruir os cabos de telecomunicação do fundo do mar, os quais representam mais de 95% do tráfego global de dados, incluindo a internet.

Além disso, o monitoramento destes eventos é prejudicado pelo fato de que a magnitude dos mesmos pode destruir ou danificar os equipamentos de monitorização local. Frente às dificuldades de controle, previsão e monitoramento da ocorrência de deslizamentos submarinos, destaca-se a importância da simulação física para uma melhor compreensão do fenômeno.

## 2.2 MECANISMOS DE RUPTURA

Os mecanismos de disparo de um movimento de massa submarina variam de acordo com as causas e o ambiente em que o deslizamento ocorre. Segundo LOCAT e LEE (2005), movimentos de massa submarinos são desencadeados tanto pelo aumento das tensões atuantes como pela redução da resistência do material, ou ainda pela combinação dos dois eventos. A Tabela 2.1 mostra alguns dos possíveis mecanismos desencadeadores de deslizamentos submarinos.

Tabela 2.1 - Possíveis mecanismos desencadeadores de deslizamentos submarinos  
(adaptado de LOCAT e LEE, 2002)

<b>Redução da Resistência</b>	<b>Aumento das Tensões</b>
<b>Fenômenos Naturais</b>	
Terremotos	Terremotos
Ondas do oceano	Ondas do oceano
Maré	Maré
Sedimentação	Sedimentação
Gases e Hidratos de Gás	Glaciação
Infiltração de Água subterrânea	Erosão
Glaciação	
<b>Fenômenos causados pela ação humana</b>	
Hidratos de gases e esgotamento de reservatório	Escavações
	Carregamentos
	Rebaixamentos

### 2.2.1 Terremotos

Uma das razões para terremotos serem considerados a causa de várias inexplicáveis ocorrências de deslizamentos submarinos é a de que as tensões de cisalhamento induzidas por terremotos são maiores que a resistência ao cisalhamento em sedimentos saturados. Segundo KVALSTAD *et al.* (2005), as tensões de cisalhamento induzidas pelo terremoto geram excesso de poropressão levando à redução da tensão efetiva e, portanto, ao início da falha.

Um dos deslizamentos de terra submarino mais notáveis associado a um terremoto é o deslizamento de Grand Banks no Canadá. MULDER e COCHONAT (1996) mencionam que o Grand Banks pode ser atribuído à liquefação cíclica resultante da exposição ao terremoto. Outros deslizamentos induzidos por terremotos que merecem ser mencionados são o deslizamento de Humboldt no norte da Califórnia - EUA, no fiorde do Saguenay em Quebec - Canadá, o deslizamento da Ilha de Vancouver na Colúmbia Britânica - Canadá em 1946 e a causa do deslizamento pelo Alaska de 1964 Terremoto (COULTER, 2005).

### 2.2.2 Ondas do oceano

HENKEL (1970), SCHWARZ (1982), PRIOR (1984), HAMPTON *et al.* (1996), LOCAT e LEE (2000) e COULTER (2005) reconhecem que as ondas do oceano podem ser uma das causas da iniciação de deslizamentos de submarinos. A ação da

onda exerce um aumento na tensão total no leito marinho que é função da altura e comprimento da onda e profundidade da lâmina d'água. Esse aumento de tensão induzido pela onda age como a força principal e exerce tensões nos sedimentos inferiores, que podem ser sentidas horizontalmente, verticalmente e, o mais importante, na direção do cisalhamento (COULTER, 2005). Porém, essa interação com o fundo marinho só ocorre em águas rasas a intermediárias.

HENKEL (1970) citou que um dos efeitos das ondas oceânicas é produzir mudanças na poropressão, em que o carregamento diferencial da água irá impor tensões sobre o solo subjacente. Se as tensões excederem a resistência do solo, podem ocorrer deslocamentos significativos. Também é considerado que há uma transferência de energia entre a onda e o solo em movimento, e o trabalho realizado contra a força de cisalhamento do solo proporciona um amortecimento ao movimento oscilatório imposto pela onda.

Embora muitos autores reconheçam que o carregamento de ondas pode ser a causa de deslizamentos submarinos, evidências limitadas foram apresentadas na literatura. O carregamento de ondas é um problema dinâmico complexo em que provas e investigação satisfatórias dependem da aquisição de dados sobre as tensões reais encontradas no fundo do mar. Os estudos que avaliam o efeito da interação das ondas com o leito marinho geralmente abordam o problema da liquefação do solo gerado no aumento das poropressões (também chamado de fluidização quando a ocorrência se dá em argilas com comportamento não drenado).

### 2.2.3 Atividades humanas

Rupturas de taludes causadas pelo homem podem ser iniciadas particularmente durante construções de portos e barragens. O aumento no uso de água destes ambientes pode causar deslizamentos submarinos se medidas adequadas de prevenção não forem implementados. Algumas rupturas importantes que ocorreram no passado incluem a ruptura do porto de Helsínquia em 1936, onde a ruptura ocorreu após a solicitação adicional decorrente do preenchimento de uma depressão com areia (ANDRESEN e BJERRUM, 1967) e a ruptura em Skagway, no Alasca, em 1994, devido a um aterro para a renovação do cais em Skagway (CORNFORTH e LOWELL, 1996).

## 2.3 DESLIZAMENTOS SUBMARINOS

Deslizamentos submarinos apresentam características muito próximas dos deslizamentos que ocorrem no continente. No entanto, além de ocorrerem em ambiente aquático, se diferenciam por envolver grandes volumes de massa de solo e percorrerem longas distâncias em ângulos muito suaves. Os escorregamentos em taludes submarinos são considerados um dos maiores riscos geológicos em ambiente marinho, pois além de comprometer a integridade das estruturas *offshore*, podem causar tsunamis devido às enormes ondas geradas durante a movimentação da massa de solo (Figura 2.1). Esse fenômeno se divide em dois grandes eventos: a ruptura e o fluxo de detritos (Figura 2.1), sendo este último o foco do presente estudo.

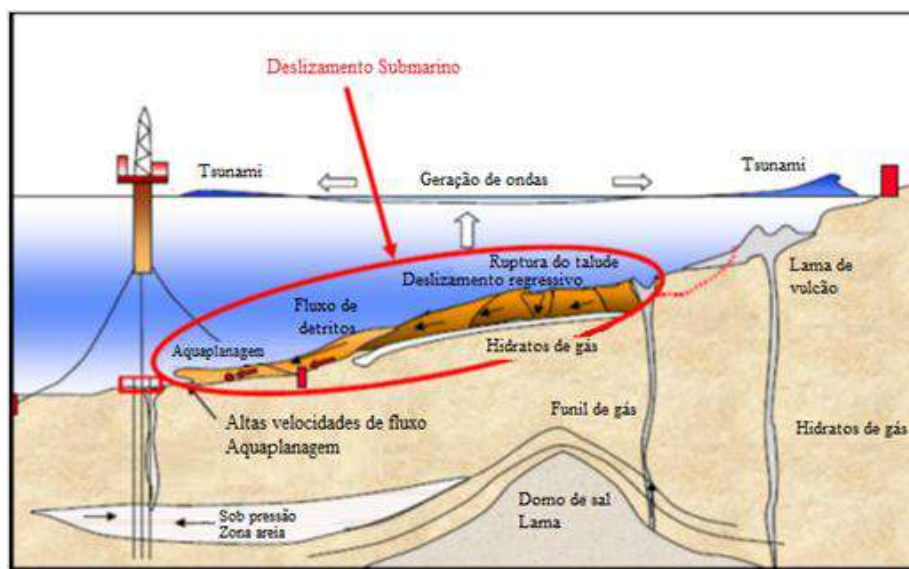


Figura 2.1 – Taludes Submarinos (adaptado de GUE, 2012)

A partir do momento que o material escorregado se deforma e passa a interagir com água do ambiente, o deslizamento passa a ser chamado de *debris flow*. Nesta fase o material é considerado um fluido viscoso e tem sua resistência e consistência variando ao longo da distância percorrida (Figura 2.2). Inicialmente os detritos se transformam em uma mistura de água e argila finamente triturada dentro de um ambiente aquoso com aspecto sólido e propriedades resultantes do solo que lhe deu origem. O evento evolui gradualmente até que o fluxo de massa esteja muito mais diluído e se torne uma corrente de turbidez.

A distância de transporte dos depósitos é conhecida como distância *run-out* e como já mencionado tem suas propriedades modificadas no decorrer do fluxo:



inicialmente o solo ainda apresenta uma parcela significativa de resistência e o deslizamento pode passar por deformação interna mínima, rompendo por cisalhamento na base; posteriormente ao atingir a condição de corrente de turbidez o fluxo se caracteriza por ser um escoamento turbulento de baixa resistência. Segundo WHITE *et al.* (2008) uma corrente de turbidez apresenta densidade e resistência interna menores que a de um *debris flow*. A Figura 2.2 apresenta a variação das propriedades do fluxo nas suas diversas etapas.

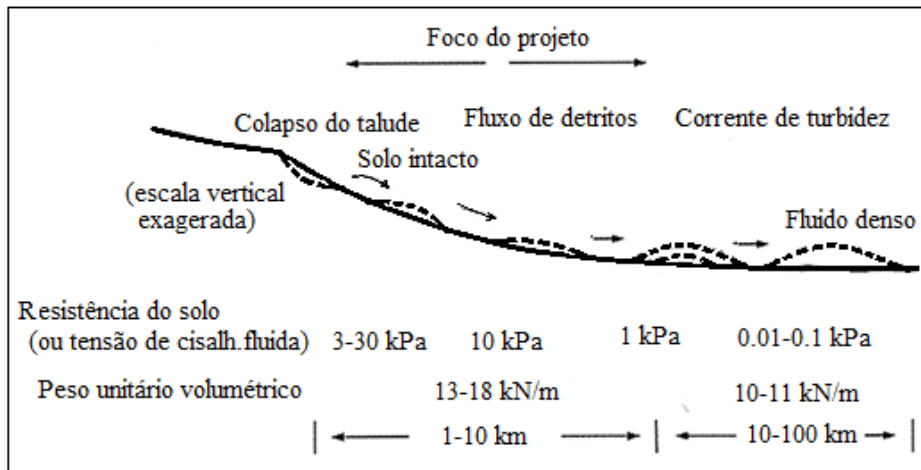


Figura 2.2 – Transições de um escorregamento submarino (adaptado de WHITE *et al.*, 2008)

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS DESLIZAMENTOS SUBMARINOS

A classificação dos deslizamentos submarinos é um tanto quanto complexa, pois sua ocorrência é observada indiretamente através de datações de carbono e levantamentos batimétricos. Inúmeros autores propõem diferentes classificações para um deslizamento submarino. SCHWARZ (1982) e PRIOR (1984) propuseram uma classificação em formato de esquema na qual o conceito de deslizamento até o fluxo é um processo contínuo (Figura 2.3). MULDER e COCHONAT (1996) complementaram esta classificação introduzindo algumas denominações adicionais como “slides”, “slump”, “creep” e “cyclic mobility”.

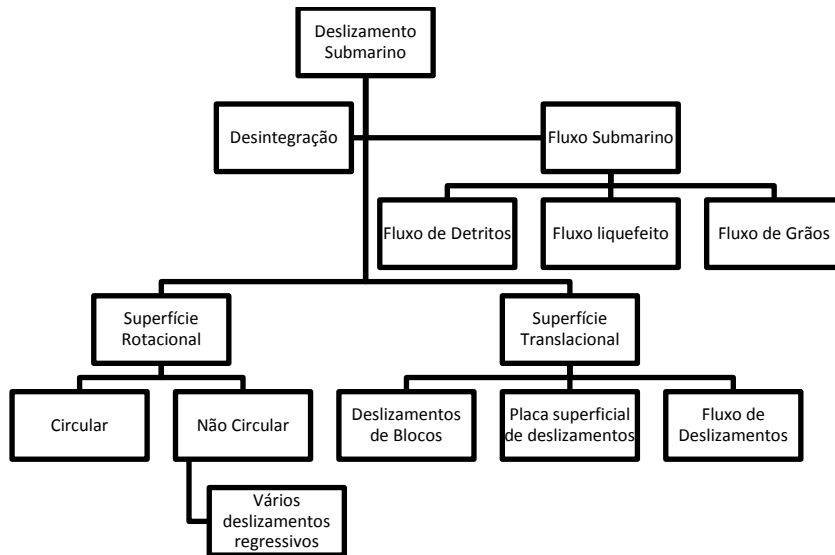


Figura 2.3 – Tipos de instabilidade de taludes (adaptado de PRIOR, 1984)

Segundo a classificação de PRIOR (1984), o fluxo submarino apresenta diferentes características em função do sedimento envolvido.

## 2.5 FASES DO FLUXO DE DETRITOS

Segundo DE BLASIO *et al.* (2004), o fluxo de detritos é um dos mais efetivos processos de transporte de sedimentos da plataforma continental ao fundo da bacia oceânica. De modo a melhor compreender um fluxo de massa, o processo pode ser dividido nas seguintes fases: inicial com ruptura dos blocos e taludes; intermediária onde ocorre a transformação do material proveniente do talude rompido, o desenvolvimento do “*debris flow*”, a geração da corrente de turbidez e o fluxo propriamente dito; e a fase final que é representada pela deposição do material.

A fase inicial envolve o mecanismo de deslizamento do talude e normalmente é compreendido segundo os princípios de mecânica dos solos. Geralmente, considera-se que o início da ruptura ocorre quando a tensão de cisalhamento resultante dos esforços mobilizados no talude excede a resistência ao cisalhamento.

Na fase intermediária, onde ocorre a transformação do material, o solo envolvido no fluxo apresenta características de um fluido não newtoniano. Fluidos não newtonianos apresentam uma relação não linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Dessa forma, apesar de serem utilizados alguns princípios da mecânica dos fluidos para a compreensão dessa fase, a mesma deve ser analisada sob enfoque geotécnico. Em função da composição do sedimento e da energia

envolvida, a duração desta fase é variável e conseqüentemente pode alterar a distância alcançada pelo fluxo, pois influenciará na velocidade e em outros parâmetros importantes do fluxo. No caso de “sedimentos moles”, essa fase representa um curto episódio. Nos casos em que o material envolvido apresenta maior resistência, a fase de desintegração representa uma parcela significativa do fluxo.

LOCAT e LEE (2000) citam como possíveis condições de contorno, responsáveis pelo diferente comportamento ao longo do fluxo, a divisão do material em duas componentes: o fluxo denso e o fluxo suspenso. O fluxo denso é geralmente associado ao *debris flow* enquanto que o fluxo suspenso, formado pelas correntes de turbidez, é governado pelas forças de arrasto agindo sobre a superfície do fluxo denso. A Figura 2.4 mostra a divisão do fluxo e as forças atuantes.

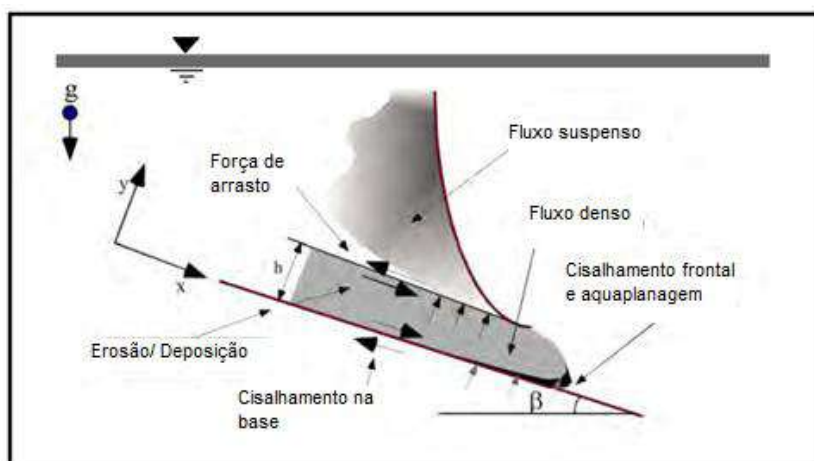


Figura 2.4 – Possíveis condições de contorno para deslizamentos submarinos (adaptado de LOCAT e LEE, 2000)

Outras possíveis condições de contorno são apresentadas por MOHRING *et al.* (1998), DE BLASIO *et al.* (2004) e ILSTAD (2005), que sugerem ser a aquaplanagem o fenômeno responsável pelo aumento da mobilidade em deslizamentos submarinos. A próxima seção fará menção sobre tal aspecto.

## 2.6 AQUAPLANAGEM

Segundo MOHRIG *et al.* (1998), as grandes distâncias observadas em deslizamentos submarinos em taludes suaves parecem ser facilitadas pela presença de uma fina camada de água ou lama de baixa viscosidade que significativamente incrementa a mobilidade dos sedimentos. De acordo com HANCE (2003), a presença

dessa camada reduz significativamente a resistência entre a massa de solo deslizante e o leito marinho e explica as longas distâncias e altas velocidades de deslizamentos submarinos em taludes muito suaves.

### 2.6.1 Condições para a ocorrência de aquaplanagem

A ocorrência da aquaplanagem pode ser evidenciada por quatro hipóteses: a primeira é que a pressão hidrodinâmica atuando na região frontal da massa deslizante exceda a tensão normal produzida pela mesma sobre a superfície normal de deslizamento. Como consequência da primeira hipótese, a segunda se dá pela deformação e descolamento da cabeça do fluxo em relação ao leito marinho. A terceira hipótese também relaciona a pressão hidrodinâmica e a tensão normal, no entanto através do número densimétrico de Froude ( $F_{rd}$ ). E a última hipótese está relacionada ao comportamento da tensão total e da poropressão.

Quando um fluxo subaquático avança através de um corpo de água, uma pressão de fluido maior do que a pressão hidrostática é induzida pelo movimento do corpo de água na parte frontal da massa em deslizamento (Figura 2.5).

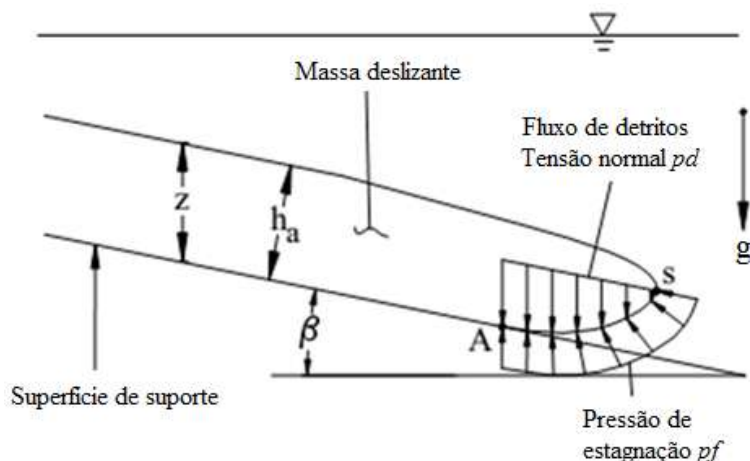


Figura 2.5 – Pressão do fluido e pressão do fluxo de detritos gerados na parte frontal do deslizamento (Adaptado de HANCE, 2003)

Nestas condições a pressão de estagnação do fluido  $p_f$  pode ser expressa como (HANCE, 2003):

$$pf = \frac{\rho_w v_f^2}{2} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde  $\rho_w$  é a densidade de massa da água e  $v_f$  é a velocidade frontal da massa deslizando. Ou seja, a pressão hidrodinâmica do fluido depende da velocidade frontal da massa deslizando.

O excesso de poropressão desenvolvido no movimento da massa atua desde o ponto de estagnação (ponto S) até a superfície do deslizamento (ponto A) ilustrados na Figura 2.5. A pressão do fluido é resistida pela tensão normal equivalente  $pd$ , atuando para baixo, e produzida pelo peso submerso da massa deslizando no talude. A tensão normal pode ser calculada por:

$$pd = (\rho_d - \rho_w)gh_a \cos\beta \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde  $\rho_d$  é a densidade do solo e  $g$  é a aceleração da gravidade. O termo  $h_a$  representa a espessura média do deslizamento e  $\beta$  é o ângulo de inclinação do talude. A aquaplanagem ocorre quando a pressão hidrodinâmica ( $pf$ ) atuando na parte frontal da massa deslizando, excede a tensão normal produzida pela massa deslizando submersa na superfície de deslizamento normal ( $pd$ ). O ponto onde a aquaplanagem se inicia é denotado por "A" na Figura 2.5.

Por ocasião da segunda hipótese para a ocorrência da aquaplanagem, MOHRIG *et al.* (1999) observaram que a parte frontal da massa deslizando (cabeça de detritos) foi tipicamente deformada. Tal deformação se deve à geração de grandes pressões aerodinâmicas. A diferença entre os diversos perfis (com ou sem aquaplanagem) pode ser observada na Figura 2.6, onde  $h_a$  é a espessura média do fluxo no canal,  $h_h$  é a espessura média da cabeça do fluxo de detrito e "s" é o ponto de estagnação.

Um caso extremo de deformação da cabeça dos detritos é mostrado na Figura 2.6c, onde a espessura da cabeça do detrito  $h_h$  é 2 a 3 vezes maior que a espessura média deslizando, caracterizando assim a ocorrência da aquaplanagem.

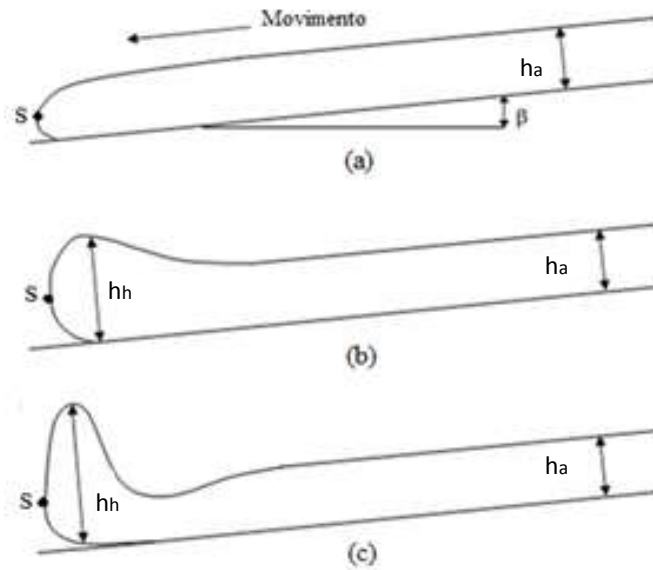


Figura 2.6 – Formação da cabeça de fluxo (a) Não ocorre aquaplanagem na cabeça do fluxo, (b) Fluxo de detritos na à beira de aquaplanagem, (c) Aquaplanagem onde uma camada de fluidos é observada abaixo da cabeça (Adaptado de MOHRIG, 1999)

Outro parâmetro utilizado para se verificar a ocorrência da aquaplanagem é o número densimétrico de Froude (MOHRIG *et al.*,1998). O  $F_{rd}$  é um parâmetro adimensional usado para caracterizar o fluxo dominado por gravidade envolvendo dois líquidos com densidades ligeiramente diferentes, e é expresso como:

$$F_{rd} = \frac{vf}{\sqrt{gl\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)}} \quad \text{(Equação 2.2)}$$

Onde  $\Delta\rho$  é a diferença de densidades entre os dois fluidos,  $\rho$  é a densidade de um dos fluidos e  $l$  é a distância percorrida. Reescrevendo a equação anterior em termos da pressão de estagnação do fluido  $p_f$  e  $p_d$ , tem-se:

$$F_{rd} = \sqrt{2\left(\frac{p_f}{p_d}\right)} \quad \text{(Equação 2.3)}$$

MOHRIG *et al.* (1998) calcularam o  $F_{rd}$  para todos os ensaios executados e concluíram que o número mínimo de  $F_{rd}$  para que a aquaplanagem ocorra é 0,30. Este valor corresponde a uma deformação significativa na cabeça do fluxo de detritos. A

Tabela 2.2 mostra o  $F_{rd}$  calculado em alguns casos históricos de deslizamentos submarinos. Observa-se que todos apresentam  $F_{rd} > 0,3$ , com exceção do escorregamento de número 80 em que provavelmente não ocorreu aquaplanagem devido a pequena distância *run-out*.

Tabela 2.2 – Números densimétricos de Froude calculados com base em medidas experimentais (MOHRIG *et al.* 1998, 1999)

Número de escorregamento	Escorregamento	$\beta$ (deg)	H (m)	Velocidade frontal (m/s)	Distância <i>run-out</i> (Km)	$F_{rd}$
80	Sandnessjoen	5	2	0,7	1,2	0,19
78	Suva, Fiji	3	30	4,47	113	0,31
57	Orkdalsford	5	10	2,6	22,5	0,31
70	Messina	3	20	6	220	0,51
10	Grand Branks	3	50	27,4	>750	1,47
71	Orleansville	15	20	19,5	110	1,68

Por fim a aquaplanagem também é observada através do comportamento da tensão total e poropressão. Segundo ILSTAD *et al.*, (2004), são encontradas três diferentes situações para o comportamento da tensão total e poropressão (Figura 2.7).

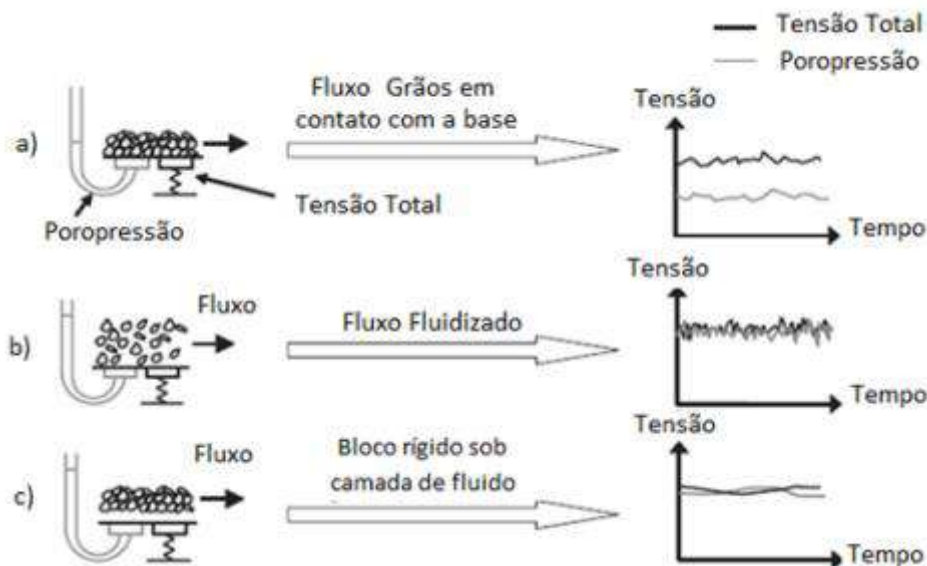


Figura 2.7 – Esquema das três principais situações do comportamento da tensão total e poropressão (adaptado de ILSTAD *et al.*, 2004)

A primeira situação (Figura 2.7a) ocorre quando o fluxo de detritos está em contato constante com o leito marinho. Na segunda situação (Figura 2.7b) o fluxo se

comporta como uma camada fluidizada, onde apesar de em algum momento os grãos entrarem em contato com o leito marinho os mesmos permanecem em suspensão. E por último (Figura 2.7c) o fluxo tem comportamento de um bloco rígido se movendo acima de uma camada de água. Este último caso se caracteriza por aquaplanagem.

## 2.7 VELOCIDADES AO LONGO DO FLUXO DE DETRITOS

Diversos estudos têm se concentrado em simular fluxos de massa, mas a maioria dos experimentos se limitam à fluxos subaéreos. Apesar de apresentar a mesma reologia, *debris flow* subaéreos e submarinos apresentam diferentes dinâmicas de transporte dos sedimentos durante o fluxo. Além de percorrerem maiores distâncias, os fluxos de detritos submarinos apresentam velocidades maiores e específicas em determinados pontos. Nesse contexto BREIEN *et al.*, (2007) procuraram estudar a dependência do ambiente em que o deslizamento está ocorrendo através da análise do campo de velocidades utilizando a técnica PIV ( *PIV - Particle Image Velocimetry*). Os autores variaram as porcentagens de areia e argila de modo a simular fluxos ricos em areia e em argila e a enfatizar as diferenças no comportamento dinâmico associado aos dois ambientes.

As diferenças mais visíveis identificadas pelos pesquisadores foram forma difusa, geração de corrente de turbidez e comportamento complexo com vórtices no fluxo submarino. Enquanto que o *debris flow* subaéreo é bem definido, com campo de velocidades desacelerando constantemente ao longo do tempo, as velocidades nos fluxos submarinos apresentam maiores flutuações. Conforme as Figura 2.8 e Figura 2.9, as velocidades médias em quatro diferentes posições, para os dois ambientes do fluxo, estão representadas por diferentes cores: linha azul (primeira câmera a montante à 3,6 metros); linha amarela (segunda câmera à 4,1 metros); linha preta (terceira câmera à 7,3 metros); e linha vermelha (quarta câmera à 7,8m). Partindo destes resultados, os estudos confirmaram que, para os fluxos subaéreos (Figura 2.9), após a passagem de uma frente de alta velocidade, a velocidade é a mesma nas quatro posições, mas diminui exponencialmente no tempo. Além disso, o movimento cessa após aproximadamente 8 segundos. Já para fluxo de detritos submarinos o comportamento da velocidade frontal e média difere em vários aspectos, conforme Figura 2.8. A velocidade média ao longo do tempo depende fortemente da concentração de argila. Para o caso de fluxos de detritos subaéreos a velocidade média



diminui com o aumento do teor de argila (Figura 2.9). No caso de fluxos submarinos para misturas de baixo teor de argila essa diminuição é suave e quase linear (Figura 2.8a), enquanto que para o alto teor de argila desenvolve-se uma cabeça de maior velocidade (Figura 2.8b). Os valores mais altos de velocidades foram obtidos para fluxo submarino de misturas com alto teor de argila (20%) (Figura 2.8b), onde a velocidade frontal possui tendência de acelerar ao longo do tempo.

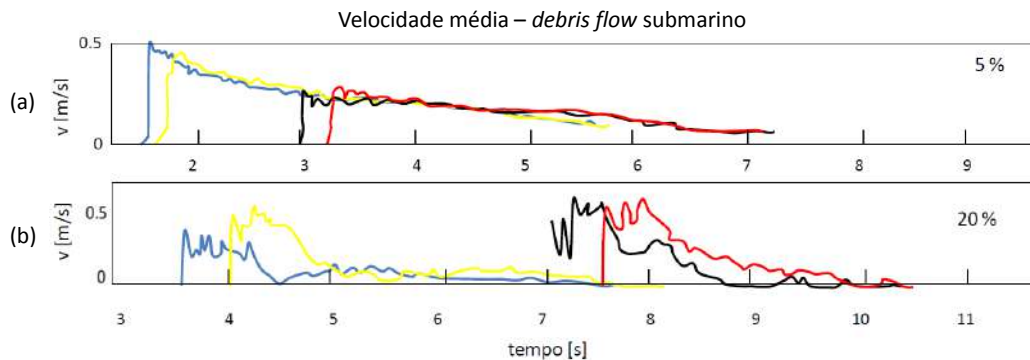


Figura 2.8 – Velocidade média ao longo do tempo em quatro diferentes posições para fluxos submarinos (adaptado de BREIEN *et al.*, 2007)

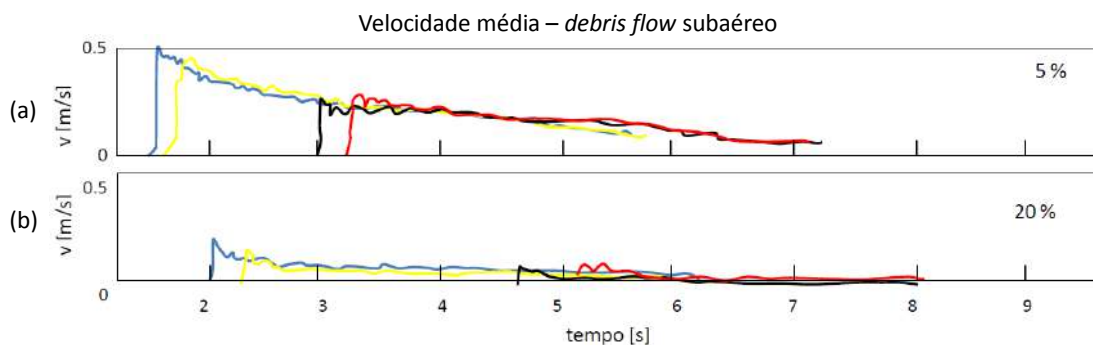


Figura 2.9 – Velocidade média ao longo do tempo em quatro diferentes posições para fluxos subaéreos (adaptado de BREIEN *et al.*, 2007)

Além disso, nos fluxos subaéreos observa-se velocidade zero próxima do leito representado a deposição (Figura 2.10a). O fluxo de detritos subaéreo é nítido e bem definido, com um campo de velocidade constantemente desacelerando em direção à cauda, conforme exemplo apresentado na Figura 2.10a.

No caso de fluxos submarinos o exemplo mostra que os mesmos são compostos de três camadas: uma primeira próxima ao fundo, outra intermediária com aspecto de fluido e por fim no topo uma corrente de turbidez composta de sedimentos

finos, como mostrado no exemplo da Figura 2.10b. Esta configuração foi também encontrada por ILSTAD *et. al.*, 2004.

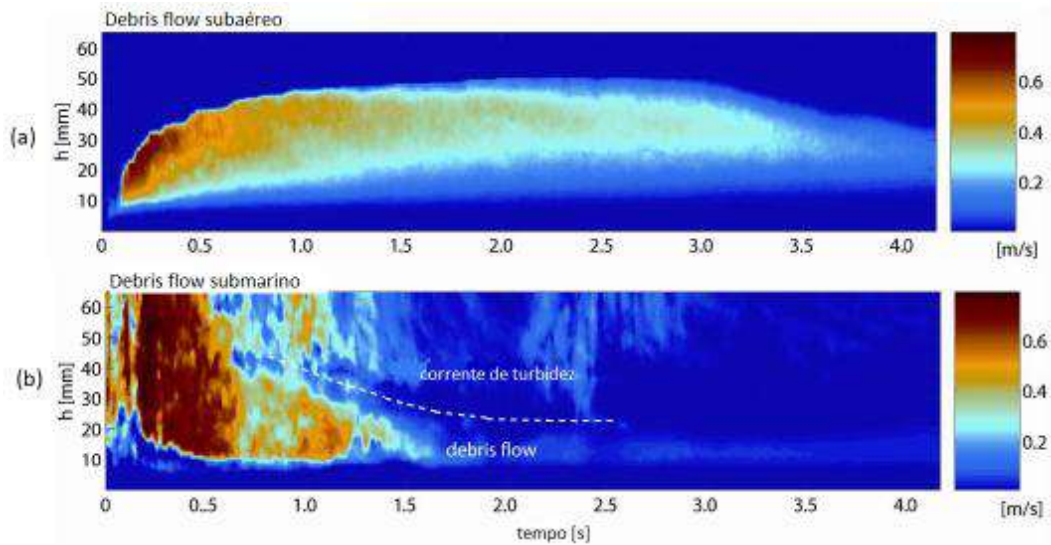


Figura 2.10 – Exemplos da distribuição da velocidade média em x para os casos: (a) fluxo subaéreo com 5% argila, 67% de areia e 28% de água; (b) fluxo submarino com 20% de argila, 52% de areia e 28% de água (adaptado de BREIEN *et al.*, 2007)

Outro aspecto observado por BREIEN *et al.* (2007) é que a cabeça do fluxo submarino apresenta maiores velocidades em relação ao corpo do mesmo, as quais se mantêm ao longo do fluxo e até mesmo aumentam para os casos de misturas com altas porcentagens de argila. Em virtude disso ocorre intrusão de uma fina camada de água na base do fluxo, fazendo com que a cabeça do fluxo se movimente tal como um bloco deslizante, processo esse conhecido como aquaplanagem.

Através do perfil de velocidades ao longo do fluxo é possível observar também que os fluxos submarinos ricos em argila apresentam valores baixos no meio do perfil de velocidades coincidindo com a fronteira entre o *debris flow* e a corrente de turbidez. Desta forma, como mostrado na Figura 2.11, existem duas posições em que a velocidade é máxima: no meio do debris flow e na transição para a corrente de turbidez, em oposição ao perfil de velocidade parabólica proposto por MOHRIG e MARR (2003). No entanto os perfis de velocidade encontrados no estudo de BREIEN *et al.* (2007) apresentam características bem similares aos apresentados por FELIX e PEAKALL'S (2006) para fluxos com alta concentração de caulinita.

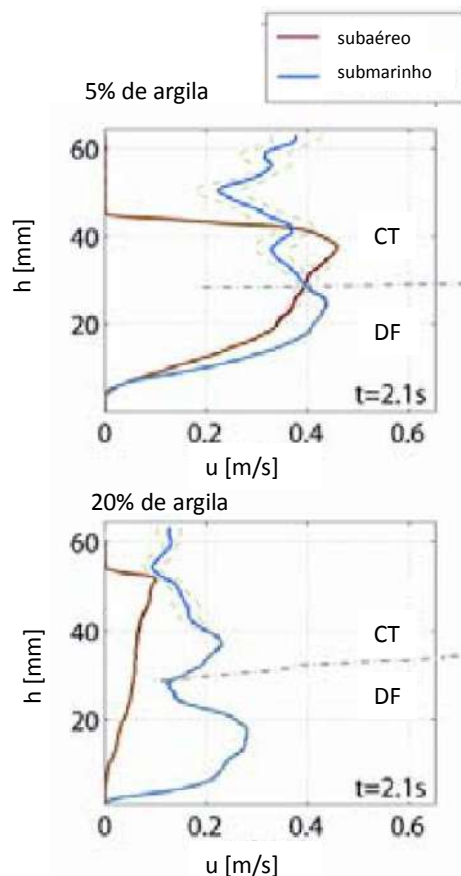


Figura 2.11 – Perfil de velocidade para fluxos subaéreo e submarino (adaptado de BREIEN *et al.*, 2007)

Na Figura 2.11 são apresentados os perfis de velocidade para fluxos subaéreos e submarinos observados por Breien *et al.* (2007). A linha tracejada representa a divisão do fluxo em *debris flow* (DF) e corrente de turbidez (CT). Em concordância com o trabalho de BREIEN *et al.*, (2007), ILSTAD *et al.* (2004) também encontraram relações similares entre as proporções de argila e areia, o ambiente do fluxo e o perfil de velocidades. A Figura 2.12 mostra as vistas laterais (Figura 2.12a), os vetores de velocidade instantâneos (Figura 2.12b) e os perfis de velocidade vertical e horizontal (Figura 2.12c) obtidos para um fluxo rico em argila. A cabeça do fluxo aquaplana como um bloco rígido em cima de uma camada de água fina. Nota-se que as velocidades verticais no fluxo denso se apresentam cinco vezes maiores em relação àquelas na corrente de turbidez. Observando-se a velocidade atrás da cabeça do fluxo, nota-se uma significativa desaceleração. Essa desaceleração e estreitamento do fluxo (Figura 2.12) induz a formação de planos de cisalhamento, possibilitando a ocorrência de cisalhamentos pontuais, sendo esta uma explicação para a flutuação da velocidade na zona alongada (*stretching zone*)

apresentada na Figura 2.12 (2º intervalo de tempo). No primeiro intervalo de tempo é possível verificar os vetores de velocidade na direção x praticamente paralelos, e com o módulo da velocidade praticamente igual. Por fim, no último intervalo, observa-se o alargamento da camada do *debris flow*.

Em contraste com os fluxos ricos em material argiloso, os fluxos ricos em material arenoso apresentados por ILSTAD *et al.* (2004) possuem uma frente de onda fluidizada, com o comportamento turbulento, onde ocorre a entrada de água no fluxo. Essa permeabilidade, presente nos fluxos ricos em material arenoso, impede a ocorrência da aquaplanagem. Esses fluxos possuem uma baixa tensão de escoamento, o que permite a sedimentação dos grãos durante o fluxo. Tal deposição é observada de forma contínua durante o fluxo e forma uma camada de material depositado abaixo do fluxo denso (Figura 2.13).

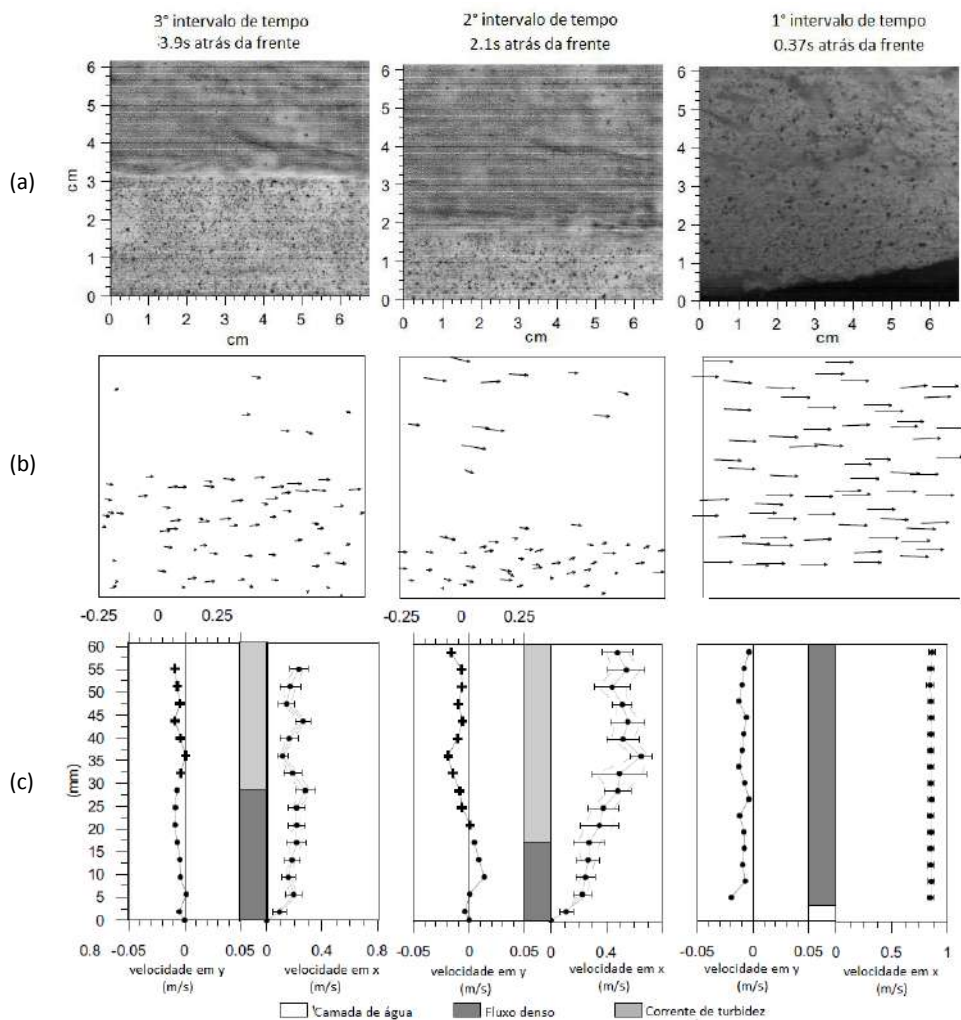


Figura 2.12 – Características obtidas para um fluxo rico em argila (a)Vistas laterais; (b) Vetores de velocidade instantâneos; (c) Perfis de velocidade vertical e horizontal (adaptado de ELVERHØI *et al.*, 2005)

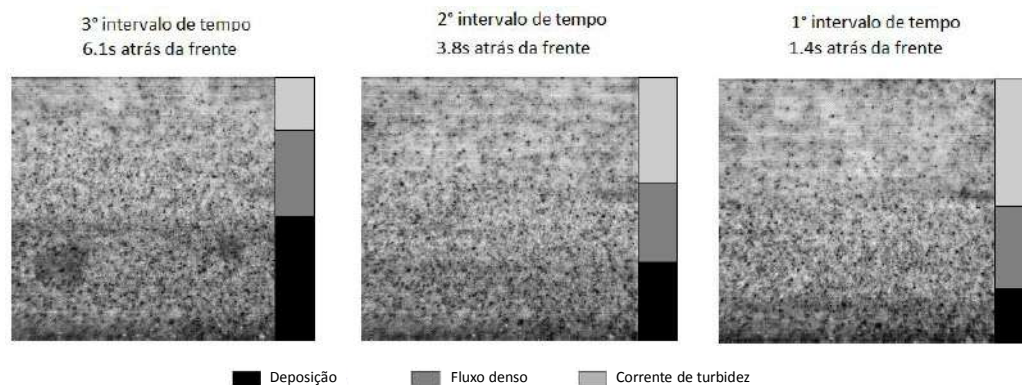


Figura 2.13 – Aspecto do fluxo submarino rico em areia (adaptado de ELVERHØI *et al.*, 2005)

Apesar de existirem alguns poucos estudos abordando o comportamento de fluxos de detritos submarinos, os estudos com modelos numéricos para a previsão do comportamento de fluxos submarinos são ainda inconclusivos. Huang e Garcia (1999) avaliaram o modelo reológico de Bingham baseando-se nos dados de MOHRIG *et al.* (1997). Eles conseguiram descrever o fluxo completo e a distância percorrida para o caso de fluxo subaéreo, no entanto o modelo não é apropriado para prever o comportamento de fluxos submarinos devido justamente ao comportamento diferenciado causado pela aquaplanagem. Dessa forma o estudo do comportamento do campo de velocidades de um fluxo submarino é de fundamental importância para que seja possível desenvolver um modelo que incorpore estas características distintas do fluxo subaéreo e consiga prever as velocidades e distâncias de *run-out*.

## 2.8 ESTUDOS EXPERIMENTAIS EM FLUXO DE DETRITOS SUBMARINOS

Trabalhos experimentais geralmente são realizados no contexto de resolver um problema particular, apoiar a investigação de algum problema ou ainda verificar uma hipótese (GUE, 2012). Se tratando de fluxo de detritos submarinos, em que os dados relativos à ocorrência dos mesmos não são obtidos diretamente no campo e no momento que o evento ocorre, experimentos em laboratório constituem uma forma de prever e melhor entender o fenômeno.

Dizer que um experimento foi realizado em ambiente 1 g significa que os ensaios foram conduzidos na condição de gravidade normal da Terra. Existem inúmeros trabalhos realizados em ambiente 1 g que tem por finalidade entender o fenômeno que ocorre durante um deslizamento submarino. Apesar de serem mais

facilmente conduzidos, os experimentos realizados em condições normais de aceleração da gravidade não são totalmente representativos dos eventos reais, caracterizados principalmente por apresentarem grandes dimensões. Como a tensão no solo está diretamente relacionada ao seu peso próprio, em ambiente 1g não é possível simular grandes tensões. Dessa forma os resultados não representam necessariamente o real comportamento do solo, tornando-os questionáveis em relação a representatividade de situações reais.

Nesse sentido a modelagem centrífuga elimina estes questionamentos relativos a modelagem física. Os modelos centrífugos são capazes de manter as relações de proporcionalidade inversa entre o campo inercial gerado e as dimensões do protótipo. A utilização de modelos menores permite também uma maior repetibilidade, e conseqüentemente maior confiabilidade dos ensaios.

O presente capítulo tem por finalidade apresentar alguns importantes experimentos, realizados tanto em condições normais de gravidade como submetidos a acelerações centrífugas.

### 2.8.1 Experimentos em ambiente 1g

De modo a compreender o transporte de fluxo de detritos, diversos experimentos em laboratório têm sido realizados. MOHRIG *et al.* (1998) simularam deslizamentos de terra submarinos em ambiente 1g utilizando uma mistura, classificada como argila siltosa, composta de 40% de argila, 35% de silte e 25% de areia. Em vários dos ensaios realizados foram encontradas evidências da ocorrência de aquaplanagem, através da observação de uma fina camada de fluido aprisionada entre a massa de solo e a superfície do deslizamento. Posteriormente o experimento de MOHRIG *et al.* (1999) procurou demonstrar a diferença fundamental entre um fluxo de detritos subaéreo e submarino. Para tal eles utilizaram um tanque de 10 m de comprimento e 0,6 m de largura, com inclinação de 6° na parte superior e 1° na inferior. A mistura consistiu de 40% de argila caulinita, 40% de silte e 20% de areia em peso. Os resultados também mostraram que em fluxos ricos em argila há formação de aquaplanagem.

MARR *et al.* (2001) conduziram ensaios variando as quantidades de argila e água das misturas de forma a avaliar a influência da proporção dos materiais envolvidos em um fluxo submarino. Os resultados mostraram que as características dos depósitos de fluxos submarinos estão diretamente ligadas à coesão do fluxo.

Fluxos com altas porcentagens de material fino aquaplanaram e fluíram em regime laminar, enquanto que fluxos com concentrações menores de material fino apresentaram maior separação do material e suspensão da cabeça do fluxo, produzindo correntes de turbidez.

MOHRIG e MARR (2003) investigaram a geração de correntes de turbidez em fluxos de detritos submarinos usando imagem acústica, uma vez que segundo os autores a concentração de sedimentos em porções diluídas desses fluxos era tão alta que não podia ser distinguida do material principal através somente de inspeção visual. Como resultado do trabalho os autores propuseram uma forma de quantificar a erosão dos sedimentos da cabeça do fluxo de detritos submarino.

ILSTAD (2005) focou seus experimentos na investigação da dinâmica e morfologia da região frontal de um fluxo de detritos submarino. Os resultados mostraram que quando ocorre aquaplanagem, a região frontal do fluxo se “descola” progressivamente do fluxo principal formando blocos deslizantes. Além disso, ele concluiu que as dimensões dos blocos deslizantes estão ligadas à resistência do material.

### 2.8.2 Experimentos envolvendo modelagem centrífuga

PHILLIPS e BYRNE (1994) realizaram ensaios centrífugos para modelar a liquefação em taludes devido à carregamentos estáticos. O interesse principal da pesquisa constituiu em simular o evento que ocorre em campo de modo a alimentar um modelo numérico que descrevesse o fenômeno. Os ensaios foram realizados em um modelo de areia saturada inclinado em 16° monitorado por transdutores de poropressão. Uma sobrecarga foi aplicada na crista da encosta submersa, fazendo a inclinação se liquefazer e fluir com movimentos laterais. Os pesquisadores concluíram que um evento de liquefação estática pode ser induzido em centrífuga, uma vez que os resultados indicaram que a liquefação ocorreu como confirmada tanto em gravações de vídeo quanto nas medições de poropressão.

ZHOU *et al.* (2002) realizou uma série de ensaios centrífugos, variando a aceleração da gravidade, a fim de obter o ângulo crítico de taludes de areia siltosa e areia fina que comprometeriam sua estabilidade. Outro trabalho visando examinar a estabilidade de taludes submarinos foi realizado por COULTER (2005) que modelou em centrífuga a ruptura de taludes submarinos devido a atividades sísmicas. Ele observou que ocorrem movimentos horizontais e verticais no talude após a ocorrência

de terremotos e que a geração de poropressão é tão maior quanto maior é a magnitude dos terremotos. Além disso, a liquefação foi um fenômeno observado com maior intensidade em locais onde o terremoto apresentava maiores magnitudes, tanto em locais mais profundos como nos limites de drenagem.

No Brasil os primeiros experimentos em escala diferente de 1g foram realizados pelo Grupo de Modelagem Centrífuga do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) em parceria com o grupo de pesquisa da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) por PARDO (2015).

PARDO (2015) buscou entender quais parâmetros, desencadeiam a formação da aquaplanagem em fluxos de detritos submarinos. Para tal foram realizados ensaios com diferentes composições do material do escorregamento variando a umidade do material em função do limite de liquidez. A simulação foi realizada na centrífuga geotécnica da UENF (Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro) utilizando uma caixa de alumínio com rampa inclinada de 6° e fundo rugoso. O monitoramento dos ensaios foi realizado através de células de tensão total e transdutores de poropressão e uma câmera de alta velocidade. A ocorrência de aquaplanagem durante os ensaios foi analisada em função de quatro parâmetros: imagens dos ensaios, tensões na cabeça do fluxo, número densimétrico de Froude e medidas de tensão total e poropressão. Inicialmente foram utilizadas nove misturas variando as proporções areia/argila (Tabela 2.3). A Tabela 2.4 mostra um resumo dos resultados obtidos em três principais ensaios para cada um dos parâmetros analisados no trabalho.

Tabela 2.3 – Configurações dos ensaios realizados por PARDO (2015)

Ensaio Nº	Mistura, % de areia	Umidade da lama	Leito Marinho
1	1 (= 0%)	$1 \times \omega_L$	Rampa de areia
2	1 (= 0%)	$1 \times \omega_L$	Rampa de areia
3	1 (= 0%)	$1 \times \omega_L$ (=59,8%)	Rampa de acrílico
4	1 (= 0%)	$1 \times \omega_L$ (= 59,8%)	Rampa de acrílico
5	2 (= 5%)	$1 \times \omega_L$ (= 58,1%)	Rampa de acrílico
6	3 (= 10%)	$1 \times \omega_L$ (= 51,9%)	Rampa de acrílico
7	4 (= 20%)	$1 \times \omega_L$ (= 48,3%)	Rampa de acrílico
8	6 (= 20%)	$1,5 \times \omega_L$ (= 72,4%)	Rampa de acrílico
9	7 (= 10%)	$1,5 \times \omega_L$ (= 77,8%)	Rampa de acrílico



Tabela 2.4 – Resumo dos resultados obtidos para a determinação da aquaplanagem (PARDO, 2015)

VARIÁVEIS QUE DETERMINAM A OCORRÊNCIA DA AQUAPLANAGEM	ENSAIO 4	ENSAIO 7	ENSAIO 8
Nas imagens de vídeo é possível observar o fenômeno de aquaplanagem?	Sim	Não	Não
O comportamento das séries de tensão total e poro pressão apresentam evidência de aquaplanagem?	Sim	Não	Sim
A Pressão de Estagnação é maior do que a Tensão normal da massa deslizante? ( $p_f > p_d$ )	Sim	Não	Sim
A Velocidade frontal do fluxo é maior do que a Velocidade crítica?	Sim	Não	Sim
O número Densimétrico de Froude é maior do que 0,30? ( $Frd > 0,30$ )	Sim	Não	Sim

Entre as principais conclusões de PARDO (2015) pode se citar:

- As características primordiais para a ocorrência de aquaplanagem são a formação da cabeça de onda durante a corrida, a intrusão de uma fina camada de água na parte frontal do fluxo e o número densimétrico de Froude maior que 0,3;
- O teor de umidade influencia a formação da aquaplanagem, uma vez que o número de Froude é dependente do mesmo;
- A influência dos parâmetros reológicos não foi avaliada no fenômeno de aquaplanagem, somente foi mencionado que o “material escorregado não deve enfraquecer o suficiente de modo a gerar uma corrente de turbidez”.

Na sequência MOTTA (2016) também simulou escorregamentos submarinos na centrífuga de braço da UENF. O autor buscou entender, variando os níveis de aceleração gravitacional, o comportamento dos escorregamentos e realizar possíveis associações dos resultados dos ensaios com a resistência ao cisalhamento não drenada do solo ( $S_u$ ). Apesar de os resultados mostrarem que a resistência não drenada varia em solos com diferentes teores de umidade, segundo o autor não há indícios que correlacionem diretamente o parâmetro com a presença de aquaplanagem.

## 2.9 MODELAGEM CENTRÍFUGA

A modelagem centrífuga consolidou-se nas últimas três décadas como uma confiável ferramenta de pesquisa e tem auxiliado no entendimento de problemas geotécnicos com condições de contorno diversas. Na indústria do petróleo, que envolve problemas relacionados a instalações *offshore*, as vantagens do uso dessa ferramenta são ainda mais evidentes. A seguir estão listadas as possibilidades e vantagens da utilização da modelagem centrífuga (MADABHUSHI, 2014):

- Capacidade de investigação de problemas complexos através da construção de modelos físicos em escala reduzida e a realização do ensaio dos mesmos em condições de campo gravitacional modificado em centrífuga geotécnica;
- Utilização de instrumentos miniaturizados no modelo, possibilitando o registro do comportamento do solo antes, durante e depois da falha a ser simulada;
- Os laboratórios geotécnicos podem criar modelos mais precisos e podem realizar os ensaios de forma repetitiva visando o aumento da confiabilidade dos resultados obtidos e nos comportamentos observados;
- Possibilita a construção de modelos com histórico de tensões conhecidos e bem controlados;
- Eventos raros e extremos como, por exemplo, cargas resultantes de terremotos podem ser simuladas a bordo de centrífugas com o desenvolvimento de atuadores customizados;
- Sequências complexas de construção podem ser modeladas em vôo visando simular o correto histórico de tensões de um problema.

O princípio da modelagem na centrífuga é reproduzir o comportamento de um protótipo em um modelo em escala reduzida  $N$  vezes submetido à aceleração centrífuga do protótipo. Com esta técnica o peso próprio, tensões e processos dependentes da gravidade são corretamente reproduzidos. Assim sendo, a partir de modelos em escala reduzida pode ser reproduzido o protótipo utilizando-se leis de escala já estabelecidas (SCHOFIELD, 1980).

Para alcançar a similitude em modelos geotécnicos é necessário reproduzir o comportamento do material tanto em termos de resistência como de rigidez. O comportamento é principalmente uma função da tensão efetiva resultante do peso próprio e das forças externas. As principais leis de escala e algumas aplicações da modelagem centrífuga são mais plenamente descritas por MURLF (1996) e TAYLOR (1995).

### 2.9.1 Leis de escala convencionais

Modelos de solo podem ser acelerados em uma centrífuga de modo a serem submetidos a um campo inercial de aceleração radial que simule o campo gravitacional terrestre, porém muitas vezes maior (SCHOFIELD, 1980). Uma amostra de solo em uma caixa acelerada numa centrífuga tem a superfície livre de tensões e um perfil de solo com um nível de tensões que aumenta diretamente com a profundidade a uma taxa relacionada com o peso específico da amostra e com campo de aceleração criado. Assim, em um modelo corretamente planejado, uma profundidade  $h_m$  possui exatamente o mesmo nível de tensões do protótipo, para uma mesma amostra de solo, a uma profundidade  $h_p$ , onde  $h_p = N h_m$  e  $N g$  é a aceleração da centrífuga. Essa é a lei básica de escala de modelos centrífugos.

Para obter equivalência de tensões entre o modelo centrífugo e o protótipo, as dimensões lineares devem ser reduzidas por um fator  $N$ , e o modelo acelerado em  $N$  vezes a gravidade. Dessa forma, as tensões (inerciais) a uma profundidade  $z/N$  no modelo serão idênticas às tensões (gravitacionais) a uma profundidade  $z$  no protótipo (Figura 2.14). A Tabela 2.5 mostra um resumo das principais leis de escala convencionais.

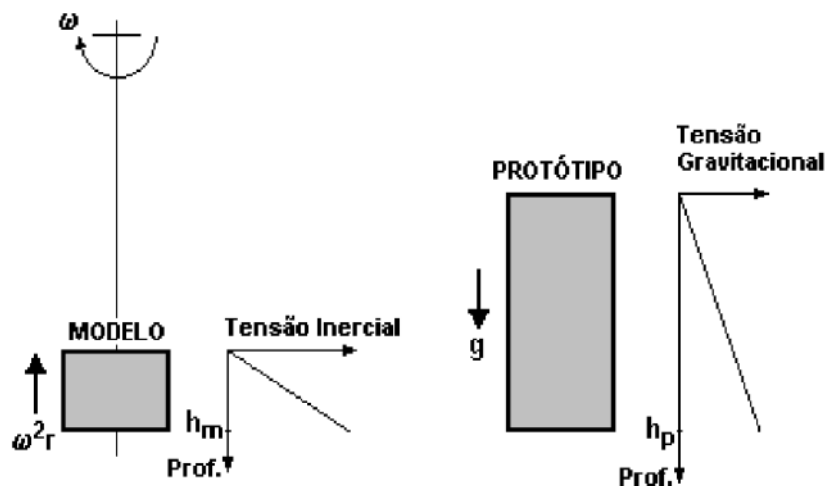


Figura 2.14 - Correspondência entre a tensão inercial em um modelo e a tensão gravitacional no protótipo (SCHOFIELD, 1980)

Tabela 2.5 – Leis de escala convencionais para modelagem centrífuga (adaptado de STEWART, 1992)

Parâmetro	Relação de Escala Modelo / Protótipo
Gravidade	N
Comprimento	1/N
Densidade	1
Massa	1/N <sup>3</sup>
Tensão	1
Deformação	1
Força	1/N <sup>2</sup>
Momento Fletor	1/N <sup>3</sup>
Tempo (difusão)	1/N <sup>2</sup>
Tempo (relaxação)	1

### 2.9.2 Modelagem centrífuga de um *debris flow*

Como já citado anteriormente, segundo as leis de escala convencionais, se um solo geometricamente similar a outro com dimensões reduzidas em uma escala  $1/N$  e peso próprio aumentado  $N$  vezes for submetido à aceleração centrífuga, a tensão em pontos correspondentes será a mesma desde que as condições de contorno sejam semelhantes. Dessa forma um incremento de tensões é determinado exclusivamente pelo incremento de deformações de modo que o deslocamento do protótipo corresponde a  $N$  vezes o movimento do modelo.

No entanto para fluxo de detritos submarinos, a premissa da relação entre a tensão e a deformação não é válida. Além das deformações serem muito grandes, levando a mistura de solo ao estado crítico, a região de contato do fluido com a superfície de escorregamento (solo marinho com a base do canal) fica sujeita a tensões de cisalhamento produzidas pelo contato. Sendo assim, as tensões efetivas do solo se tornam independentes da deformação, invalidando as leis de escala convencionais (GUE, 2012).

Dessa forma novas leis de escala foram definidas baseadas na premissa de que a resistência ao cisalhamento do fluido em movimento é devida a efeitos viscosos (dependente da taxa de deformação). Outra premissa adotada é a de que o movimento do solo na direção perpendicular a direção do talude é desprezível se comparado com o movimento na direção paralela ao talude.

Em IVERSON e DENLINGER (2001) foi desenvolvido um modelo que generaliza as equações de profundidade média de massa e balanço de momento para descrever massas fluídas com diferentes proporções grão-fluído se movendo em terrenos tridimensionais, desde a fase inicial até a deposição. São assumidas então as premissas de que as tensões efetivas do solo são governadas pelo critério de ruptura e que a viscosidade contribui na resistência ao cisalhamento.

Com o objetivo de elaborar leis de escala aplicáveis ao fluxo de detritos submarinos, GUE (2012) realizou uma série de ensaios em centrífuga. Os experimentos consistiram em simular um fluxo de detritos submarino variando os níveis de  $g$  e posteriormente validar os mesmos através de modelagem numérica. GUE (2012) tomou como base o trabalho de IVERSON e DENLINGER (2001), no qual é possível prever a velocidade do fluxo a partir dos parâmetros do material e do nível de aceleração da gravidade por meio das seguintes equações adimensionais:

$$\left[ \bar{v}_x \cdot \frac{3v_f \mu}{(\rho - \rho_w) g_z \bar{h}^2} \right]_{modelo} = \left[ \bar{v}_x \cdot \frac{3v_f \mu}{(\rho - \rho_w) g_z \bar{h}^2} \right]_{protótipo} \quad (\text{Equação 2.4})$$

$$\left[ t \cdot \frac{3v_f \mu}{(\rho - \rho_w) \bar{h}^2} \right]_{modelo} = \left[ t \cdot \frac{3v_f \mu}{(\rho - \rho_w) \bar{h}^2} \right]_{protótipo} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Combinando as (Equação 2.4 e (Equação 2.5) tem se:

$$\left( \frac{t_{modelo} g_{modelo}}{\bar{v}_{modelo}} \right) = \left( \frac{t_{protótipo} g_{protótipo}}{\bar{v}_{protótipo}} \right) \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde  $\bar{v}_x$  é a velocidade média do fluxo na direção  $x$  (paralela à superfície do talude);  $\rho$  é a densidade da mistura;  $\rho_w$  é a densidade do fluido envolvente;  $g_z$  é a aceleração gravitacional;  $\bar{h}$  é a espessura do fluxo;  $v_f$  é a fração em volume do fluido, e  $\mu$  é a viscosidade da mistura.

Dessa forma GUE (2012) observou principalmente que: a altura do fluxo obedece às leis de escala convencionais: ( $h_{protótipo} = N h_{modelo}$ ); o campo de tensões dentro do fluxo é igual para o modelo e protótipo; a velocidade média do fluxo segue a escala:  $\bar{v}_{protótipo} = N \bar{v}_{modelo}$ ; enquanto que a distância percorrida pelo fluxo segue a relação:  $L_{protótipo} = N^3 L_{modelo}$ .

A Tabela 2.6 resume as leis de escala para a modelagem de um *debris flow* exploradas no trabalho de GUE (2012).

Tabela 2.6 – Leis de escala para modelagem centrífuga de fluxo de detritos (GUE, 2012)

PARÂMETRO	PROTÓTIPO	ESCALA DO MODELO
Aceleração da gravidade	I	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	$\epsilon$	$\epsilon$
Poropressão	u	u
Velocidade do fluxo	v	v/N

## 2.10 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS

A Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) é uma técnica de medição de velocidades não intrusiva e quantitativa que permite a coleta de informações de deslocamentos entre duas imagens em frações de segundos. A técnica foi originalmente desenvolvida na área experimental da mecânica dos fluídos (ADRIAN, 1991). Foi inicialmente implementada usando fotografias duplas instantâneas de um fluxo de tal forma que cada partícula possui um par de imagens. Em análises PIV a fotografia é dividida em uma malha de áreas de interrogação. O vetor de deslocamento em um dado intervalo de tempo é encontrado localizando o pico da função de auto correlação de cada uma dessas áreas de interrogação. O pico de uma função de auto-correlação indica que as duas imagens de cada partícula capturadas estão se sobrepondo uma a outra. A correlação do *offset* é igual ao vetor de deslocamento.

Segundo WHITE (2003), na área de Geotecnia o PIV tem sido usado com uma abordagem modificada: enquanto que os fluídos requerem partículas traçadoras para gerar condições para o processamento de imagens, as areias possuem textura própria, grãos com diferentes cores e variações na luz entre grãos adjacentes de forma que a análise em PIV consegue reconhecer as características de cada grão de

areia sem adição de qualquer partícula. No caso das argilas é necessário adicionar material com textura de “flocos” ou então areia colorida.

O processamento das imagens conduzido em uma análise de PIV consiste em comparar imagens digitais capturadas em diferentes instantes de tempo, de forma a medir o deslocamento entre um par de imagens digitais como é mostrado na Figura 2.15 e na Figura 2.16. A imagem é dividida em uma malha de áreas de interrogação, onde área de interrogação  $I_{test}(U)$  consiste de uma amostra da matriz da imagem  $I(U)$ , de tamanho  $L \times L$  pixels.

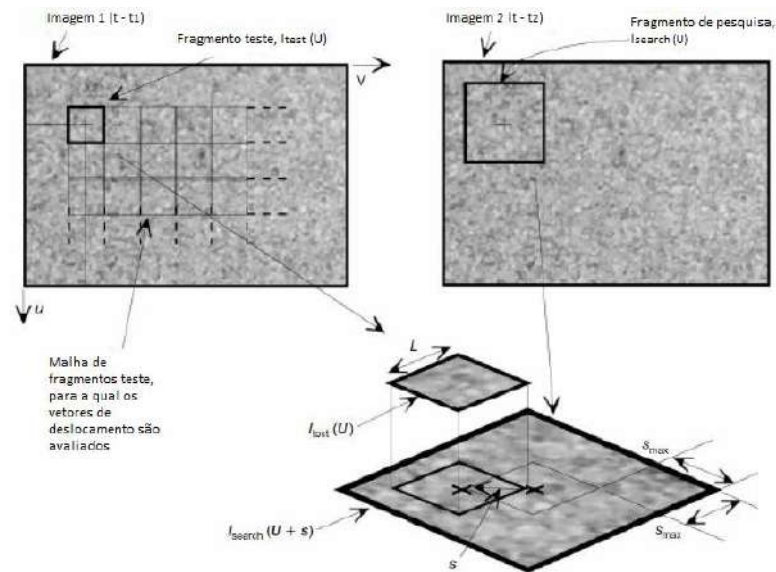


Figura 2.15 – Manipulação das imagens durante a análise PIV (adaptado de WHITE, 2003)

Para encontrar o deslocamento das áreas de interrogação entre duas imagens, um fragmento de pesquisa  $I_{search}(U+s)$  é extraído da segunda imagem e é estendido até uma distância  $s_{máx}$ , nas direções  $u$  e  $v$ , definindo a zona que o fragmento será pesquisado. Posteriormente é avaliada a correlação cruzada de  $I(U)$  entre as matrizes  $I_{test}(U)$  e  $I_{search}(U+s)$ . O plano resultante da correlação normalizada é chamado de  $Rn(s)$ , e indica o grau de coincidência entre a área de interrogação e área de busca sobre o grau de deslocamento no domínio de  $(s)$ .

O pico mais alto no plano da correlação cruzada normalizada,  $Rn(s)$ , indica o vetor de deslocamento da área de interrogação, chamado de  $(s)$  e calculado tomando como origem o centro da área de interrogação  $(u_i$  e  $v_i)$  da imagem 1 somados aos deslocamentos médios calculados  $(u_i+Du$  e  $v_i+Dv)$ .

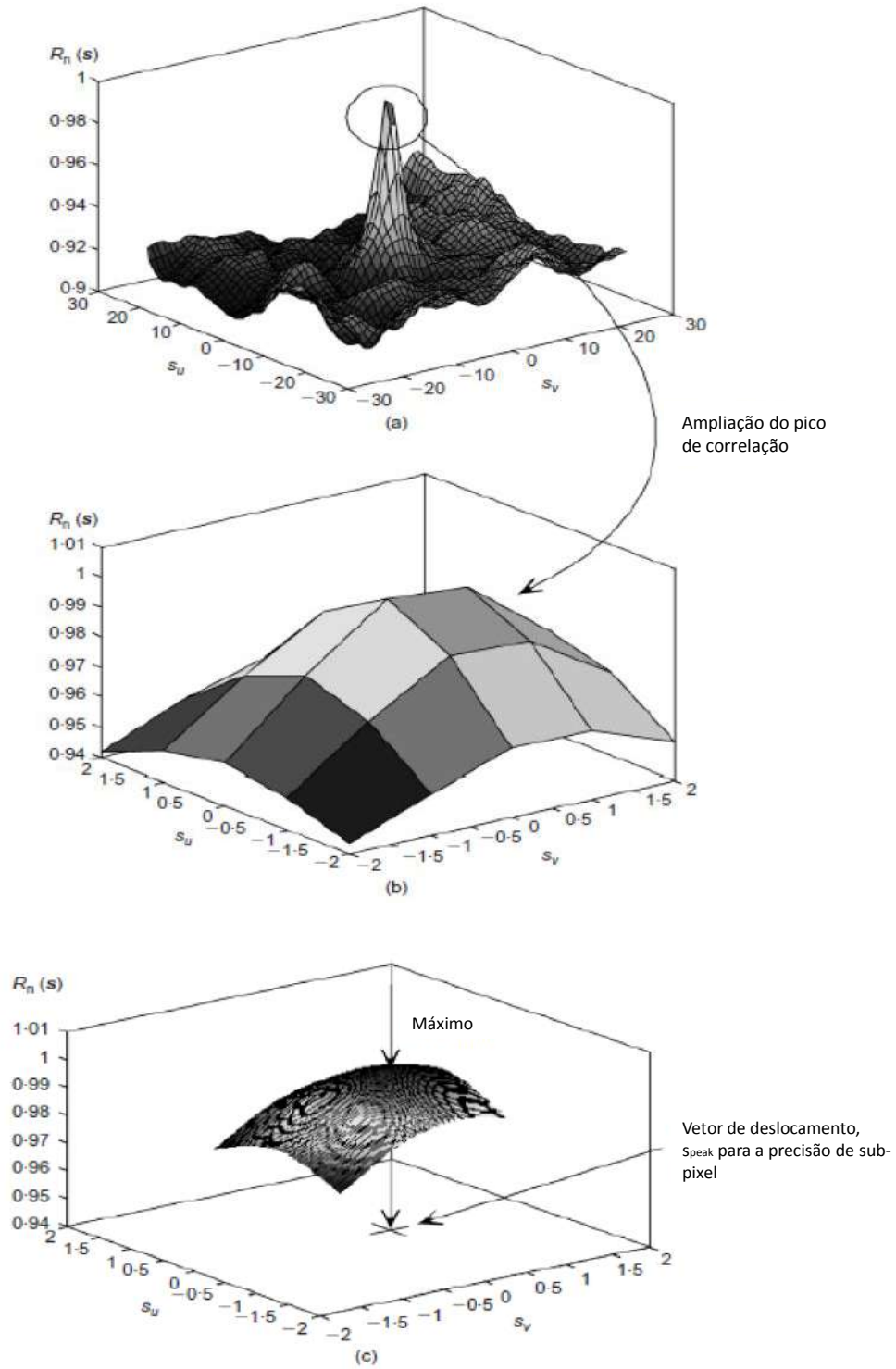


Figura 2.16 – Avaliação do vetor de deslocamento no plano de correlação  $R_n(s)$  (WHITE *et al.* 2003)

O plano da correlação normalizada  $R_n(s)$  é avaliado sobre uma resolução de pixel. Por esta razão se executa um ajuste através de uma função de interpolação cúbica ou gaussiana sobre a região em torno do pico. Ao realizar este processo o



vetor de deslocamento passa a ter uma resolução de pixel para uma de sub-pixel produzindo uma resolução do sistema de 0,005 pixels ou mais de acordo com a função de interpolação alcançando assim uma maior precisão no valor de deslocamento.

Esse procedimento se repete para cada área de interrogação da malha definida inicialmente, gerando um mapa de vetores a qual mostra o campo de deslocamentos no intervalo das duas imagens. Esse processo pode se repetir para várias imagens quantificando um campo de deslocamentos de um processo a ser estudado em um intervalo de tempo definido. Para reduzir o requisito computacional, as operações de correlação são realizadas no domínio da frequência ao tomar a transformada rápida de Fourier (FFT) de cada área e seguindo o teorema de convolução.

### 2.10.1 Escolha do software

Diante dos inúmeros softwares para PIV disponíveis no mercado, MORALES *et al.* (2014) avaliou três softwares que se desenvolvem dentro da plataforma MatLab:

- OpenPIV (TAYLOR *et al.* 2010) que substituiu o software UraPIV;
- PIVSleuth (KENNETH *et al.* 2000) software da Universidade de Illinois;
- PIVLab (THIELICKE *et al.* 2014) desenvolvido na Universidade de Groningen, para a tese de doutorado “ *The flapping flight of birds*”.

Um dos testes realizados pelo autor foi utilizando um corpo de prova cilíndrico de plasticina (pasta moldável composta de argila plástica, cera, azeite, enxofre e zinco). O teste foi executado com deslocamentos controlados e suficientemente grandes para serem inspecionados visualmente, avaliando o efeito das texturas e a medida dos deslocamentos. Na Figura 2.17 observa se a mesma imagem processada nos três programas e a Figura 2.18 mostra três pares de imagens obtidas com PIVLab de um corpo de prova com três texturas diferentes.

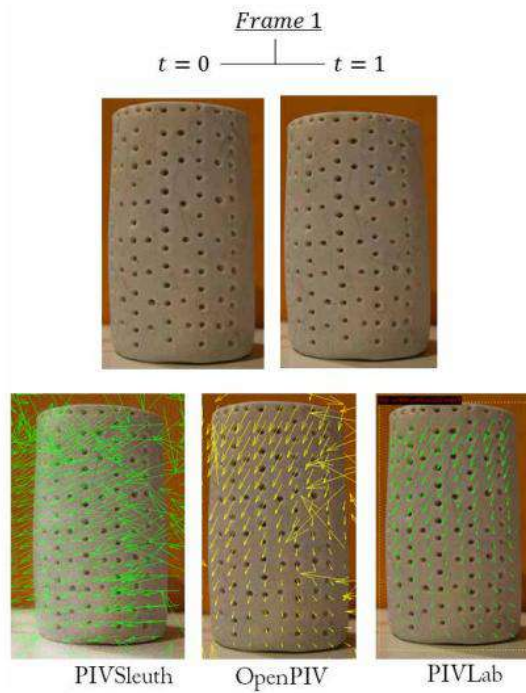


Figura 2.17 – Avaliação dos três programas PIV em um corpo de prova (MORALES *et al.*, 2014)

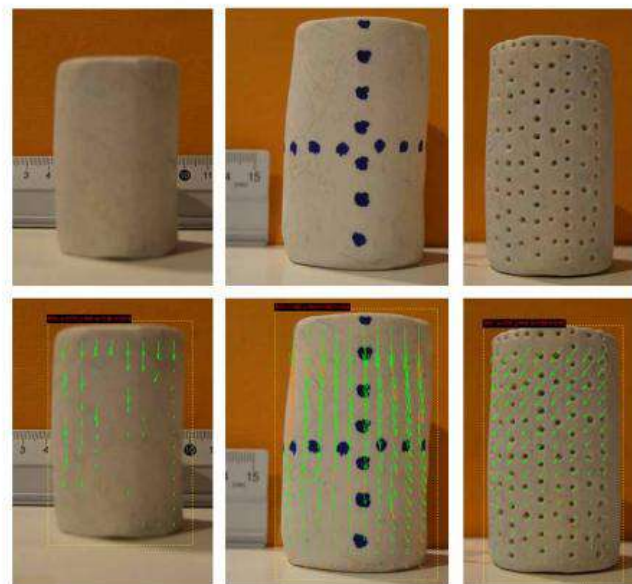


Figura 2.18 – Imagens de três corpos de prova processados no PIVLab (a) sem textura, (b) marcas no centro da amostra, (c) pontos por toda amostra (MORALES *et al.*, 2014)

O autor avaliou ainda outros cinco critérios dos três softwares e classificou segundo uma escala de 0 a 10:

- (1) Interface do usuário
- (2) Apresentação dos resultados
- (3) Precisão com diferentes texturas
- (4) Direção e magnitude dos deslocamentos
- (5) Pós processamento

Os resultados da avaliação se encontram na Tabela 2.7 a seguir.

Tabela 2.7 – Resumo dos resultados da avaliação dos softwares de PIV (adaptado de MORALES *et al.*, 2014)

<b>Critério de Avaliação</b>	<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>	<b>(4)</b>	<b>(5)</b>
OpenPIV	6	7	7	6	6
PIVSleuth	4	6	3	3	3
PIVLab	9	8	9	8	9

MORALES *et al.* (2014) obteve as seguintes conclusões:

- OpenPIV calcula bem a direção e magnitude dos deslocamentos, no entanto sua interface com o usuário não é tão confortável;

- O PIVSleuth, como foi desenvolvido em 2000, apresenta um inconveniente maior de não reconhecer as texturas e os vetores não possuem sentido, direção e magnitude correta;

- O PIVLab, desenvolvido em 2013, é um software livre que apresenta uma interface gráfica muito amigável com o usuário, os vetores foram calculados corretamente e ainda possui uma ferramenta de pós processamento muito útil.

Dessa forma, o software utilizado nas análises PIV do presente estudo foi o PIVLab (Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB). As análises PIV realizadas nesse software consistem em três passos principais: pré-processamento, avaliação e pós-processamento de imagens.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os equipamentos já existentes bem como os que foram desenvolvidos para obtenção dos dados experimentais desse trabalho. Também são apresentados os materiais e procedimentos adotados para a realização dos ensaios de modelagem física. Sendo assim foi detalhado o funcionamento da centrífuga geotécnica da COPPE, as modificações e inclusões efetuadas neste equipamento para a realização dos ensaios centrífugos. Este detalhamento se justifica pela necessidade de um registro escrito do sistema, facilitando futuras manutenções e atualizações.

### 3.1 CONCEPÇÃO GERAL DO ENSAIO

O esquema de montagem do ensaio se concentrou em simular, da melhor maneira possível, as condições reais do momento posterior à ruptura do talude submarino, desde o início do fluxo de detritos até a deposição final do material carregado. Assim sendo, os ensaios físicos consistiram no lançamento de lama em um canal localizado no tambor de uma centrífuga geotécnica. Os ensaios foram realizados em 40g com monitoramento da velocimetria por meio de um sistema PIV e das tensões geostáticas através de transdutores de poropressão e tensão total. Mais detalhes sobre o aparato físico e a instrumentação são apresentados na sequência. A consistência do solo utilizado foi escolhida com base nos resultados dos ensaios de caracterização e principalmente em ensaios reológicos.

### 3.2 SOLO UTILIZADO

A utilização de solo artificial foi adotada em função da maior repetibilidade conferida por este tipo de material e menos variáveis para controle. Inicialmente utilizou-se um caulim de fabricação brasileira. No entanto os ensaios de caracterização das amostras associados a ensaios reológicos mostraram uma ampla dispersão da tensão de escoamento em função do índice de liquidez, mesmo em amostras do mesmo lote de fabricação. A Figura 3.1 mostra a variação da tensão de escoamento em função do índice de consistência para duas amostras de caulim de um mesmo lote.

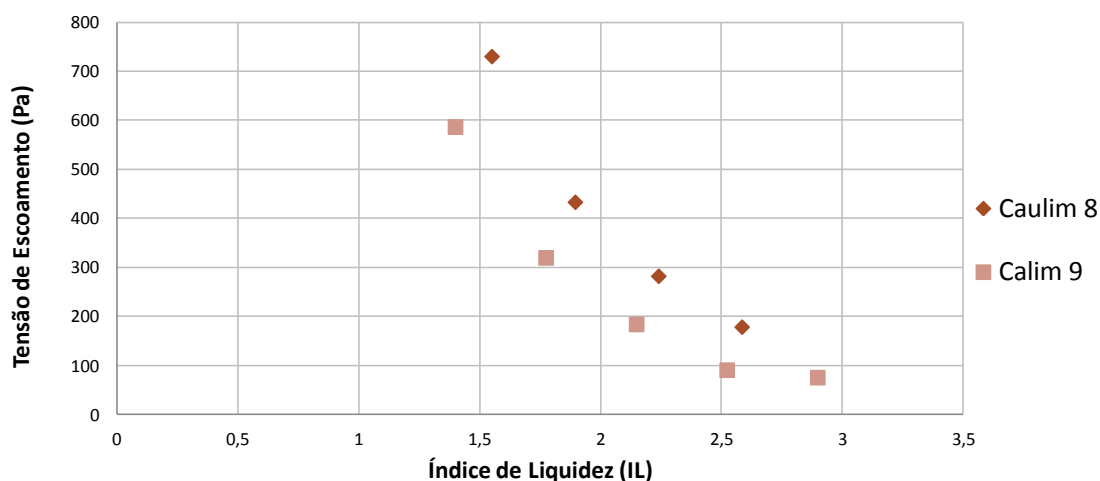


Figura 3.1 - Variação da tensão de escoamento em função do índice de liquidez para duas amostras do caulim inicialmente utilizado

Tal fato levou a adoção do caulim industrial *Speswhite*, que possui características e parâmetros mais bem definidos devido ao rigoroso controle de fabricação e é utilizado em centros de pesquisa no mundo todo. Dessa forma, foram realizados ensaios de caracterização do novo material, que confirmaram as informações obtidas em outros trabalhos, como mostrado no trabalho de FERNANDES *et al.* (2017) (Tabela 3.1).

As seguintes normas foram utilizadas para a caracterização do material:

- NBR-6508-84, para determinar a densidade dos grãos do solo;
- NBR- 6459-84, para determinar o limite de liquidez;
- NBR7180-84, para determinar o limite de plasticidade;
- NBR-7184-84 para determinar a distribuição granulométrica.

Tabela 3.1 - Comparação das propriedades físicas do caulim *Speswhite* (FERNANDES *et. al.*, 2017)

Parâmetro	Presente Estudo	HODDER e CASSIDY (2010)	LEMOS e VAUGHAN (2000)	AHMAD et al (2015)
$w_l$ (%)	62	61	72	-
$w_p$ (%)	23	27	36	-
$I_p$ (%)	39	34	36	-
Gs	2,62	2,6	-	2,63

A Figura 3.2 mostra a curva granulométrica do solo artificial utilizado. Pode se observar claramente que 100% do material passa na peneira #200, indicando uma composição granulométrica extremamente fina.

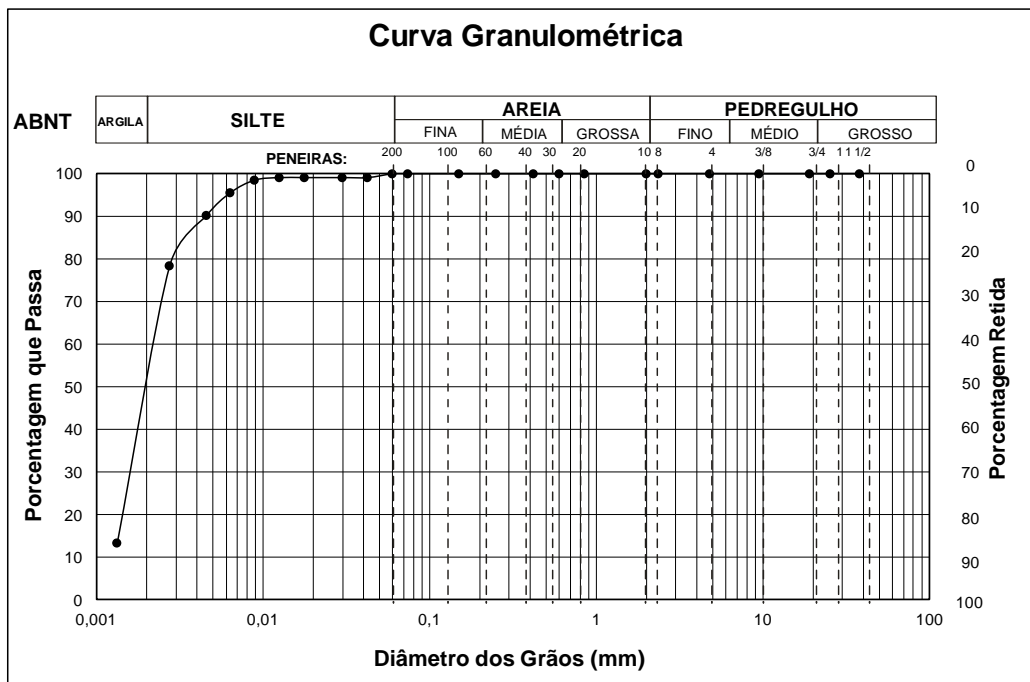


Figura 3.2 - Curva granulométrica do solo artificial utilizado (FERNANDES, 2018)

Como o solo adotado apresenta cor branca e ausência de grãos foi necessário incorporar partículas traçadoras afim de possibilitar a leitura do sistema PIV. A escolha destas partículas teve como foco promover o contraste na imagem e a menor interferência possível nas características geotécnicas do solo. A escolha da partícula e outros detalhes estão descritos no item 3.4.4.

Usualmente são adotados para a umidade da mistura, valores em torno de uma vez e meia o limite de liquidez do solo. No entanto como a incorporação de partículas traçadoras altera as propriedades da lama, o controle da consistência do material se baseou principalmente na tensão de escoamento e viscosidade obtidos em ensaios reológicos. A homogeneização do caulim e água foi realizada em um misturador durante trinta minutos antes do ensaio e somente do final do procedimento acrescentava-se a partícula traçadora de modo a obter um melhor controle da umidade desejada. Maiores detalhes são descritos na metodologia de ensaio.

### 3.3 APARATO EXPERIMENTAL DA MODELAGEM CENTRÍFUGA

#### 3.3.1 Centrífuga de tambor da COPPE

Os ensaios foram desenvolvidos na centrífuga geotécnica de tambor fabricada pela empresa *G-Max Scotland Ltd*, e instalada em 1996, no Laboratório de Geotecnia da COPPE. O equipamento possui cerca de 1,7 m de comprimento, largura e altura, pesando 4,1 toneladas. O interior do equipamento conta com um tambor de diâmetro interno de 1,0 m e largura de 0,25 m, onde podem ser realizados ensaios que necessitem de uma caixa com extensão maior, como é o caso da simulação de '*debris flow*'. Esse tambor pode atingir uma aceleração de 450g a uma velocidade de 900 rpm, suportando uma carga máxima de 200 kg, o que significa uma capacidade de carga total de 90 g ton. Informações detalhadas sobre a centrífuga de tambor da COPPE podem ser obtidas em OLIVEIRA (2005). Diversas outras pesquisas utilizaram este equipamento, citando-se Pacheco (2006), Fagundes (2010) e Pequeno (2013), todos estes estudos relacionados à área de Óleo e Gás. Citam-se também os trabalhos de Calle (2007) e Motta (2008) em outros temas, também utilizando a centrífuga de tambor da COPPE.

O equipamento conta ainda com um sistema de alimentação e drenagem de água, que podem ser utilizados durante o voo. Além disso foi implementado um novo DAS (Data Acquisition System) com 25 canais, aumentando a possibilidade de instrumentação dos ensaios. O sistema de aquisição de dados é melhor descrito no item 3.6.

#### 3.3.2 Canal de amostras

O canal de amostras foi projetado com base no utilizado por GUE (2012). A caixa teste é de alumínio e possui 1,1 metros de comprimento externo, o que corresponde, por exemplo, a um comprimento de 70,4 km quando acelerado a 40g (Figura 3.3a). No projeto inicial a rampa foi construída utilizando EPS (Poliestireno Expansível), sendo este material escolhido por ser simultaneamente leve e compacto exigindo menores volumes de contrapeso (Figura 3.3b). A rampa de EPS era revestida por uma camada de borracha, de modo a melhorar a impermeabilização, seguida de uma lixa para simular a rugosidade do fundo do mar, como mostrado na Figura 3.3a. No entanto no decorrer dos ensaios a rampa apresentou imperfeições e vazamentos

difíceis de serem controlados, justificando a substituição do material da rampa. Assim, a solução encontrada foi substituir completamente o EPS por resina Epóxi líquida, material este que se adaptou perfeitamente por preencher todos os espaços e então eliminando fugas de água e vazamentos.

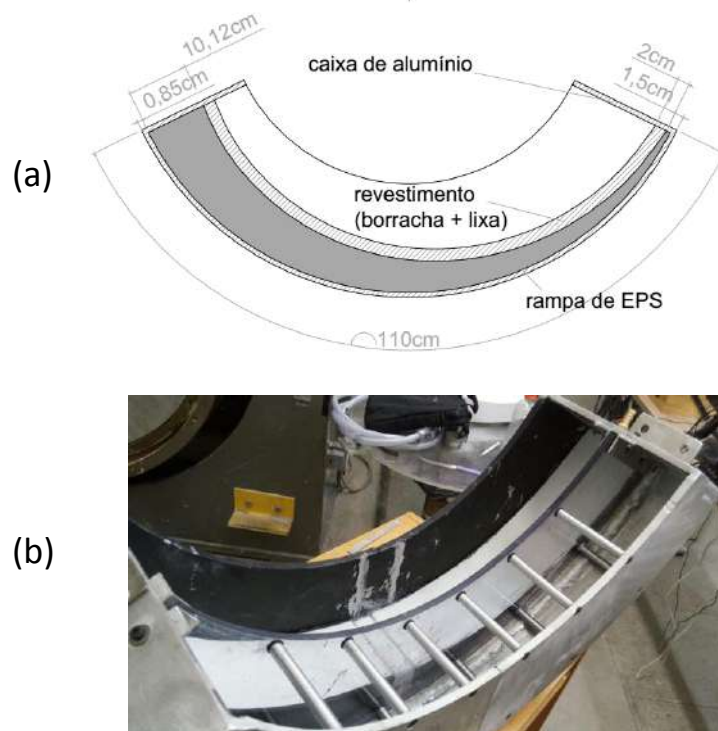


Figura 3.3 – (a) Projeto inicial do canal de amostras; (b) Canal de amostras com rampa em EPS

Uma placa de policarbonato transparente divide a caixa em dois compartimentos (Figura 3.4), possibilitando que câmeras de alta resolução e velocidade monitorem o ensaio em um dos lados da mesma. O outro compartimento, com 11 cm de largura, é o local onde a lama é lançada. Este lado da caixa conta com uma rampa de 5° de inclinação, simulando taludes de inclinação suave. A rugosidade do leito marinho continuou sendo simulada pela fixação de fita adesiva antiderrapante na parte superior da rampa. A instrumentação foi instalada de modo a parte superior dos transdutores ficassem faceando a ultima camada de revestimento da rampa, conforme Figura 3.4.



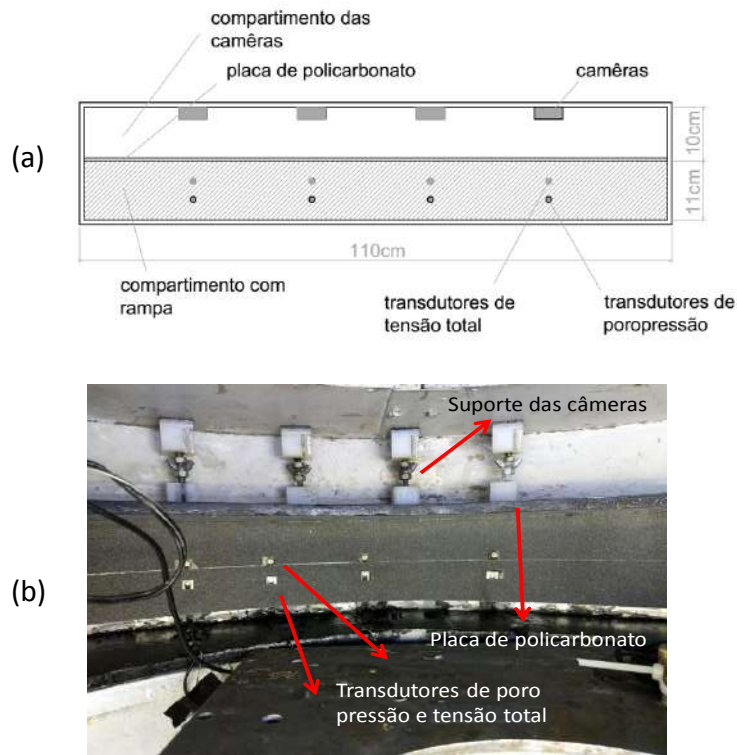


Figura 3.4 – (a) Projeto da vista superior da caixa de ensaios; (b) Vista superior da caixa de ensaios

Embora as câmeras sejam a prova d'água, o compartimento das mesmas foi vedado de modo que em hipótese nenhuma a lama atingisse esse compartimento e que a luz não incidisse diretamente sobre as câmeras. Alguns testes realizados fora da centrífuga verificaram que a inclusão dessa vedação melhorava muito a qualidade das imagens, uma vez que eliminava o reflexo da luz na placa de policarbonato.

No final do canal está localizado um sistema de dissipação de energia, com a finalidade de evitar que as ondas retornem ao local de ocorrência do deslizamento da lama, o que poderia alterar os resultados obtidos na instrumentação. Tal aparato foi reproduzido utilizando cerdas de vassoura piaçava de modo que a energia das ondas se dissipasse ao passar pelos vãos entre as cerdas.

O fato de um dos compartimentos ser de resina epóxi (material denso) e a presença de outros acessórios como por exemplo as câmeras e seus suportes tornou necessária a contabilização de um contrapeso para o equilíbrio da centrífuga. Dessa forma, todos os materiais inclusos foram contabilizados no cálculo de equilíbrio para então definir o volume de água a ser utilizado na caixa de contrapeso.



Figura 3.5 – Caixa de ensaios e caixa de contrapeso

### 3.3.3 Procedimento de lançamento da lama

No trabalho de PARDO (2015), realizado em centrífuga de braço a lama lançada na rampa ficava armazenada dentro da própria caixa de ensaio. Entretanto na presente pesquisa este procedimento não seria o mais adequado, sendo então a lama lançada por meio de um funil com controle de vazão alimentado externamente ao tambor da centrífuga. A Figura 3.6 mostra o funil que alimenta a caixa de ensaios controlada por dois registros: um de gaveta que controla a vazão e o outro de fechamento rápido responsável pelo início/fim do lançamento. Vale ressaltar que a inserção da lama é feita quando a centrífuga está basculhada e o funil está na posição vertical.



Figura 3.6 – Funil de alimentação

No decorrer dos primeiros ensaios, observou-se a necessidade da modificação do aparato de lançamento apresentado na Figura 3.6, pois a lama não fluía de forma satisfatória apenas por gravidade em misturas com baixo teor de umidade. Dessa forma justificou-se a construção de um aparato que envolvesse aplicação de pressão para a corrida da lama. Segundo GUE (2012), caso a lama ficasse armazenada dentro da caixa antes da corrida, o material poderia segregar e adensar rapidamente quando submetido a altas acelerações centrífugas. Embora no novo aparato de lançamento a lama ficasse armazenada em um tubo externo, ou seja, que não estava submetido a aceleração centrífuga, tomou-se a precaução de encher o recipiente cerca de 5 minutos antes do lançamento. Apesar da utilização de pressão externa, grande parte do volume do solo ficava preso nas paredes do recipiente, reduzindo consideravelmente o volume de lama lançado. A solução adotada foi a utilização de um balão de látex dentro do tubo para facilitar a descida da lama.



Figura 3.7 - Sistema de lançamento de lama utilizando pressão externa

A entrada de água na caixa de contrapeso era realizada através de um recipiente posicionado a cerca de 2,20m de altura (em relação ao canal de amostras). O tubo passa por uma união hidráulica giratória, entrando por dentro da centrífuga e saindo dentro da caixa de contrapeso. Este sistema de alimentação é relativamente lento, mas suficiente para a alimentação do contrapeso. O sistema de enchimento de água na caixa de ensaios foi acoplado ao sistema de lançamento conforme apresentado mostrado na Figura 3.7.

O controle de retirada de água do canal de amostra foi realizado por válvulas solenoides. Este sistema de controle de saída de água é independente do sistema de

multiplexação e possui simples acionamento através de uma chave on/off no console de controle, reduzindo falhas e dando simplicidade a operação e manutenção do sistema. Inicialmente optou-se por utilizar válvulas solenoides plásticas (Figura 3.8a) que devido ao mau funcionamento foram substituídas por válvulas metálicas (Figura 3.8b). Vale lembrar que as válvulas passavam por uma limpeza após cada ensaio. Este cuidado se faz necessário, tendo em vista que mesmo com a utilização de um filtro no final da rampa, ocorria com frequência a entrada de caulim na válvula prejudicando assim o seu funcionamento.



Figura 3.8 –Válvula solenoide: (a) plástica; (b) metálica

Na Figura 3.9 é apresentada uma visão mais ampla da montagem da centrífuga utilizada nos ensaios físicos do presente trabalho.



Figura 3.9 –Visão geral da montagem do aparato experimental

## 3.4 INSTRUMENTAÇÃO

### 3.4.1 Transdutores de tensão total e poropressão

A instrumentação do canal foi composta de quatro linhas ao longo do fluxo. As medidas de poropressão e tensão total foram obtidas por meio de transdutores instalados nestas linhas da rampa e seguem a seguinte especificação:

- Transdutor de Tensão Total: EPL-D12-7B
- Transdutor de Poropressão: EPB-PW-7BS/PC0.5/L5M

O transdutor de poropressão EPB-PW (Figura 3.10a) é especificamente designado para medidas de poropressão em centrífugas e equipamentos de laboratório e o EPL-D (Figura 3.10b) é uma célula de tensão total com uma membrana de aço inoxidável.

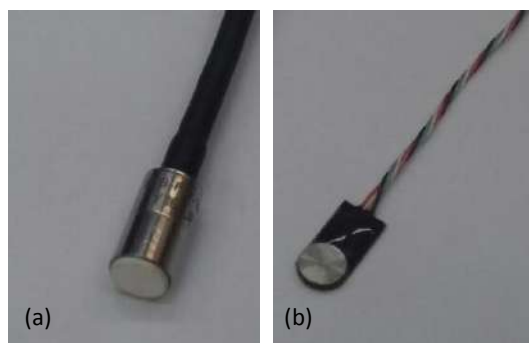


Figura 3.10 – Transdutores de poropressão e tensão total

Inicialmente as linhas de instrumentação estavam distribuídas uniformemente ao longo de todo o comprimento da rampa. Porém em alguns ensaios preliminares foi possível avaliar as zonas de maior probabilidade de ocorrência de aquaplanagem. Assim com a necessidade da construção de uma nova rampa durante a campanha de ensaios citada anteriormente, optou-se também por realizar uma redistribuição das linhas de instrumentação dispondo os sensores espaçados de 10 cm e de forma mais concentrada no centro da caixa (Figura 3.11). Cada uma das linhas de instrumentação contou também com câmeras de pequenas dimensões e alta resolução e velocidade para a captura de imagens que posteriormente foram analisadas e tratadas em um *software* PIV. A Figura 3.11 mostra um esquema da organização das linhas de instrumentação.

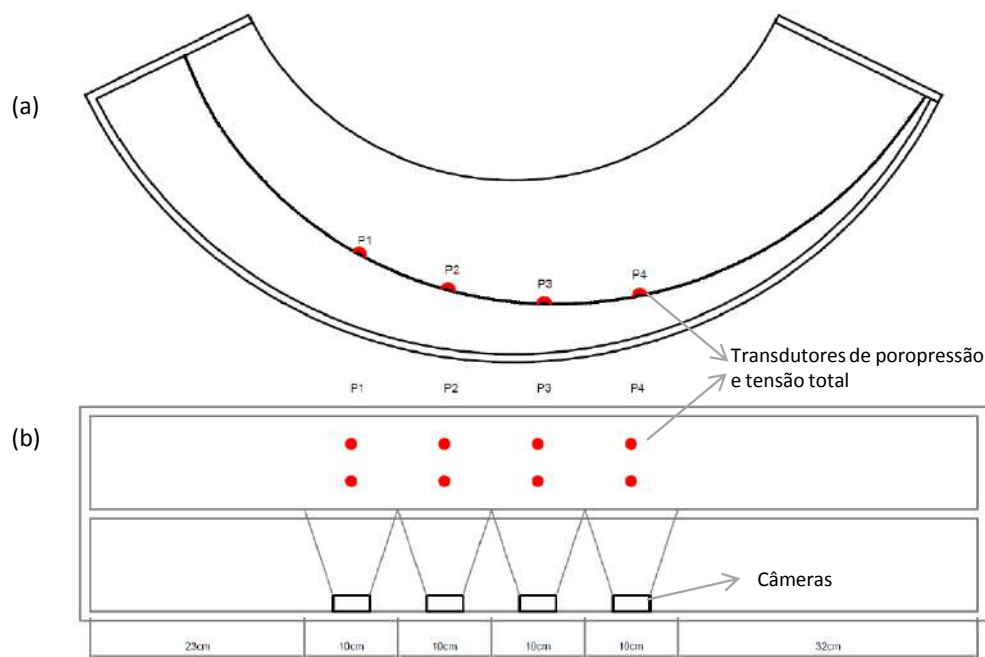


Figura 3.11 - Posicionamento das linhas de instrumentação: (a) vista lateral (b) vista superior

### 3.4.2 Saturação e calibração dos transdutores em voo

Optou-se pela calibração em vôo dos transdutores de modo a obter uma melhor reprodução das condições de contorno do ensaio centrífugo. Para tanto foram fixados adesivos graduados em cada linha de instrumentação de forma que a calibração fosse realizada sempre em pares (mesmas leituras para o transdutor de poropressão e tensão total). O processo de calibração consistiu em lançar água pigmentada a cada 30 segundos e realizar leituras da coluna d'água em cada posição (Figura 3.12). Em paralelo foram realizadas as leituras de poropressão e tensão total. A curva de calibração de um dos sensores (CTT1) é apresentada na Figura 3.13 e as leituras obtidas estão dispostas na Tabela 3.2. As demais curvas de calibração são apresentadas no Anexo 1.

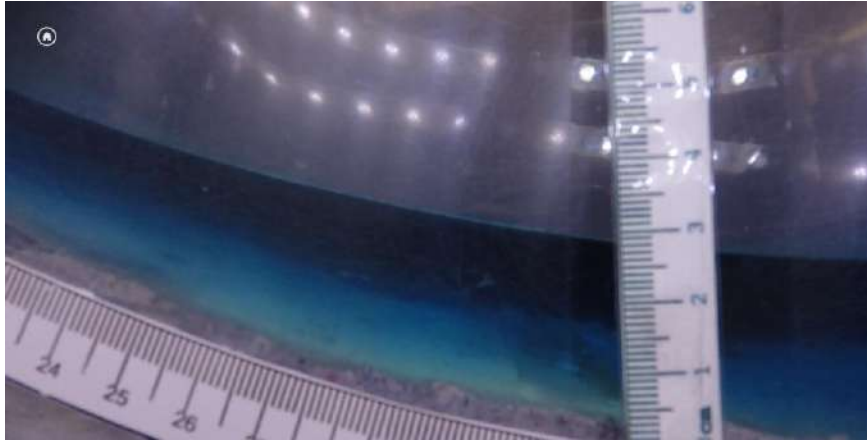


Figura 3.12 - Coluna d' água pigmentada utilizada na calibração

Tabela 3.2 - Leituras dos sensores durante a calibração

<b>Leitura CTT 1</b>	<b>leitura régua modelo (cm)</b>	<b>Pressão (kPa)</b>
-14370	1,05	35,35
-14470	1,3	43,62
-14550	1,55	51,84
-14640	1,8	60,01
-14750	2	66,50
-14825	2,25	74,56
-14925	2,45	80,98
-15000	2,65	87,35
-15060	2,85	93,70
-15170	3,05	100,00
-15260	3,3	107,84
-15345	3,5	114,06
-15430	3,7	120,26
-15515	3,9	126,41
-15600	4,1	132,54
-15675	4,35	140,14
-15750	4,55	146,18
-15830	4,72	151,29
-15900	4,95	158,16
-15990	5,2	165,58
-16080	5,4	171,47

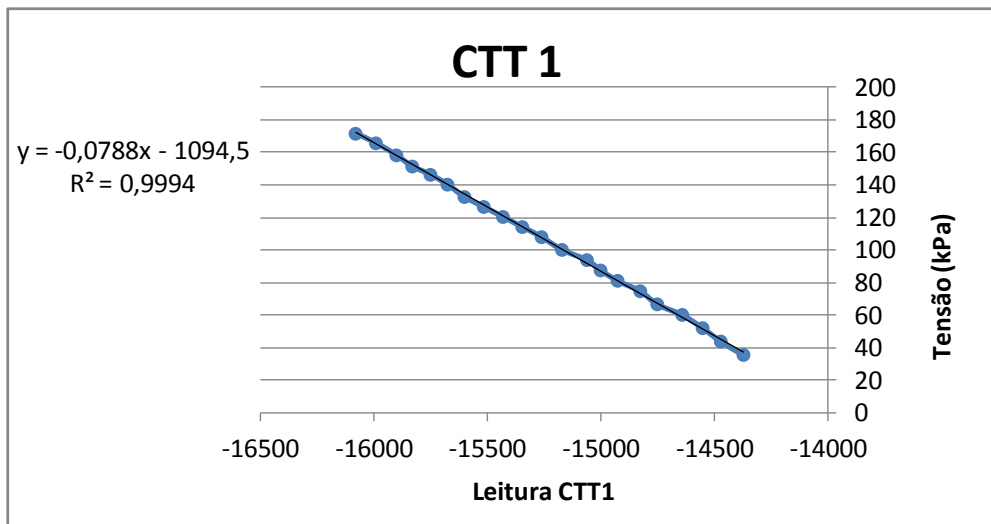


Figura 3.13 - Curva de calibração do sensor CTT1

### 3.4.3 Câmeras

O monitoramento das imagens durante os ensaios utilizou a câmera *GoPro Hero 5 Black* (Figura 3.14), que diferentemente das versões anteriores desta câmera, apresenta a opção modo linear, que elimina as distorções de imagem característica das lentes *fisheye* apesar de diminuir o campo de visão (Figura 3.15). A resolução utilizada foi de 2,7K a 60 fps no modo linear de vídeo. Além disso, a câmera conta com uma estabilização avançada, tecnologia que recebe o nome de *Professional-Grade Electronic Video Stabilization* e de fato reduz, consideravelmente, os tremores nas gravações. Esta última característica é de relevante importância em ensaios centrífugos uma vez que quando submetidos a altas acelerações podem apresentar trepidações. Outras características da câmera importantes de serem citadas são a resistência a pressão de coluna de água de até 10 metros e a conectividade *Wi-Fi* que permite seu acionamento e visualização em tempo real sejam realizados externamente por meio de um *smartphone*.



Figura 3.14 – Câmera utilizada no monitoramento do ensaio





Figura 3.15 – Imagens com e sem distorção

#### 3.4.4 Textura Rastreável

Para realizar a análise PIV é necessário que o solo apresente uma textura rastreável. No caso de areias essa textura é conferida pelos seus próprios grãos, mas para argilas há necessidade da adição de partículas traçadoras para que as pequenas partes do solo sejam rastreadas.

Quanto mais grosseira é a textura, menor definição é necessária para o rastreamento, e mais pobre de informações será o campo vetorial de velocidades. Por outro lado, quanto mais fina é a textura mais definição é necessária para o rastreamento, e mais rico de informações é o campo vetorial de velocidades. A quantidade de marcadores de textura também está diretamente ligada à qualidade da análise gerada. Cabe ressaltar que, caso o solo seja homogêneo e não possua textura natural utilizável, a adição de marcadores de textura pode vir a modificar o comportamento original do solo, transformando-o em outro material, diferente daquele que se quer estudar. Portanto, objetiva-se uma mistura com a adição da menor quantidade possível de marcadores, e em tamanho suficiente, para que possam ser rastreados, interferindo o mínimo com o comportamento do solo (OLIVEIRA, 2005).

Oliveira (2005) ressalta também que grãos muito pequenos tendem a ser carregados facilmente pela massa de solo em movimento, não opondo qualquer resistência ao fluxo. Por outro lado, à medida que o tamanho dos grãos aumenta, eles tendem a romper localmente com mais facilidade a matriz de solo, não acompanhando o fluxo e invariavelmente desaparecendo dentro da massa de solo. Dessa forma, mais uma vez o desejável é que o tamanho dos marcadores seja o menor possível.

Baseado nas suposições de Oliveira (2005) e ao fato de que para o presente trabalho o solo utilizado tem coloração homogênea branca e não apresenta textura rastreável, foram adotadas partículas traçadoras de cor preta com diâmetro de grãos passando na peneira #30 e ficando retido na #100. O material adotado como marcador foi rejeito de carvão vegetal, devidamente peneirado e lavado de modo a manter apenas a granulometria de interesse. Apesar de alterar as propriedades do solo, este material apresenta baixa massa específica, permitindo um perfeito arraste durante o ensaio.

Como o acréscimo de partículas traçadoras modifica as propriedades da mistura, o parâmetro de controle foi a tensão de escoamento. Após vários testes variando as proporções de caulim e carvão, os resultados de leitura do PIV mostraram que a proporção ideal de partículas traçadoras era de 10%. Os primeiros ensaios foram baseados na tensão de escoamento do material utilizado por PARDO (2015) e a partir de então foram implementadas as variáveis do estudo (umidade e pressão de lançamento).

A Figura 3.16 mostra o aspecto da mistura (caulim e partículas traçadoras) utilizada em testes preliminares realizados para verificação da proporção ideal para o software PIV. Os testes mostraram que o percentual de 10% de carvão forneceu um resultado bastante satisfatório e então essa foi a proporção adotada na realização dos ensaios.

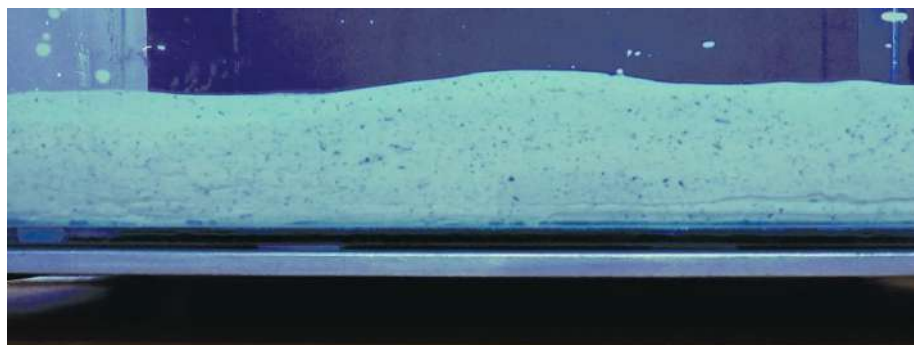


Figura 3.16 – Aspecto da mistura teste (solo + partículas traçadoras)

#### 3.4.5 Validação do software PIV

Alguns testes preliminares foram realizados de forma a validar a eficácia tanto dos traçadores quando do software PIVLab (MORALES *et al.*, 2014). Estes testes foram realizados em uma caixa de vidro em movimento, com a mistura do solo e o

rejeito de carvão. Inicialmente, as imagens foram processadas e foram reconhecidas pelo software PIV, mostrando que a partícula traçadora escolhida é ideal.

De forma a validar o *software*, a mistura de solo e partículas traçadoras dispostas em uma caixa de vidro foi submetida a movimentos apenas horizontais. A Figura 3.17 mostra o campo de velocidades obtido. Observa-se que o resultado encontrado está de acordo com o esperado, uma vez que os vetores se apresentaram quase que em sua totalidade na horizontal. Esta avaliação prévia do *software* PIVLab foi importante tendo em vista que a precisão e o desempenho dos resultados são afetados por fatores, como por exemplo tipo do solo, sua aparência, condições de iluminação e uniformidade dos grãos.



Figura 3.17 – Resultados da análise no software PIV

### 3.5 ILUMINAÇÃO

De modo a obter uma melhor qualidade de vídeo foram instaladas luzes de LED dispostas uniformemente na caixa de contrapeso e papel alumínio em toda superfície interna do tambor da centrífuga. Desta forma a iluminação incide diretamente e indiretamente sobre as câmeras. A alimentação da iluminação se deu através de uma fonte de 12 volts localizada no DAS. A Figura 3.18 apresenta o sistema de iluminação no interior da centrífuga.

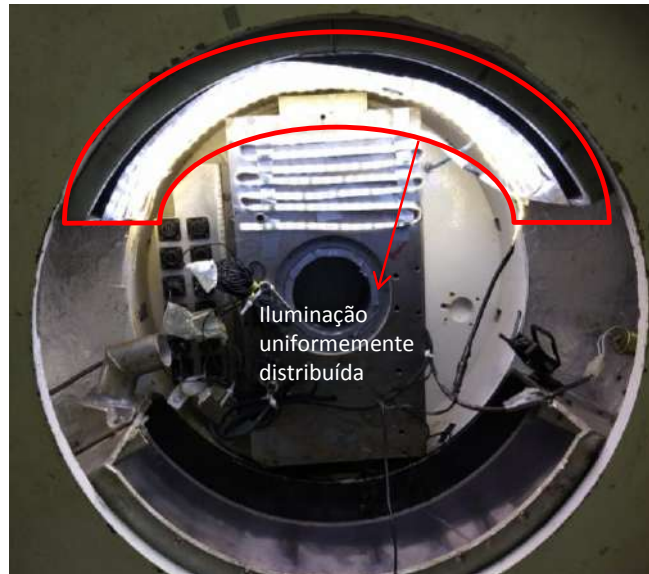


Figura 3.18 – Sistema de iluminação no interior da centrífuga

### 3.6 AQUISIÇÃO DE DADOS

Desde 1996 a centrífuga geotécnica de tambor da COPPE vem operando e passando por melhorias de modo a aperfeiçoar a concepção inicial do equipamento. No antigo sistema de aquisição de dados todas as ligações entre os equipamentos de bordo (giratório) e os equipamentos estacionários eram realizadas através de dispositivo especial com escovas chamadas de anéis deslizantes, destinadas à alimentação e obtenção de sinais. Um problema constante enfrentado era a má qualidade na aquisição de sinais e muitas vezes a perda de ensaios devido a falha no sistema que interrompia a aquisição de dados.

Enquanto que o antigo sistema contava com um sistema de módulos onde os sinais são multiplexados e enviados para um computador externo através dos anéis deslizantes, no novo sistema todos os equipamentos estão instalados a bordo e a transmissão dos sinais é através de rede sem fio (*Wi-Fi*). O sistema *onboard* é composto por um micro PC de processador *i5*, HD de estado sólido e operando pelo Windows 10. O micro PC se conecta a placa do DAS que também está localizada *onboard* e está ligada à base de conectores. A alimentação do sistema é através de duas fontes, uma para o micro e a outra de 12 volts para a iluminação. A Figura 3.19 mostra um esquema do sistema de aquisição de dados.

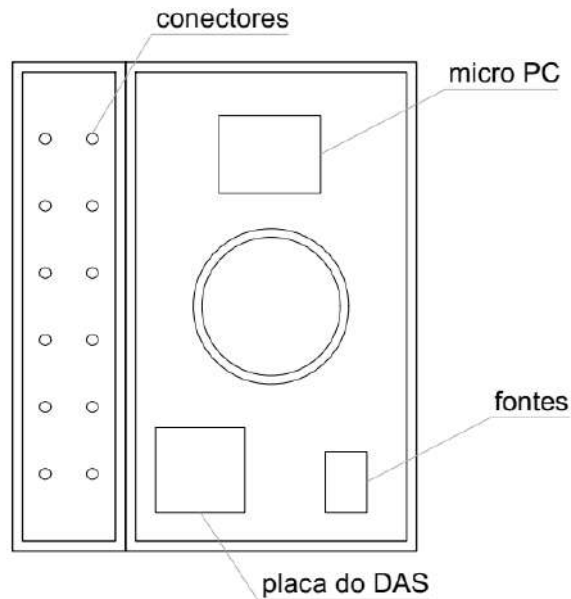


Figura 3.19 – Sistema de aquisição de dados

### 3.7 PROGRAMA DE ENSAIOS

A fim de simular corrida de detritos em ambiente marinho foram realizados ao longo desta pesquisa um total de trinta ensaios centrífugos. Neste projeto grande parte dos ensaios serviram apenas para a definição das condições de contorno e avaliação do comportamento geral esperado na modelagem centrífuga proposta. Vinte e quatro dos trinta ensaios foram necessários para, por exemplo, definir o intervalo de umidades e pressões que seriam utilizados, determinar procedimentos padrões para a realização dos ensaios e definir o volume de solo a ser ensaiado. Em alguns ensaios ocorreram também falhas na instrumentação, não permitindo que os mesmos fossem utilizados. Sendo assim foram selecionados seis ensaios que serão apresentados e analisados no presente estudo.

Como já mencionado anteriormente, testes preliminares mostraram que o percentual de 10% de carvão forneceu um resultado bastante satisfatório nas leituras do PIV. Dessa forma todos os ensaios foram realizados utilizando a seguinte proporção: 90% de caulim e 10% de carvão. Os parâmetros variáveis das misturas foram então a umidade e a pressão de lançamento. A nomenclatura de cada ensaio é dada pelo teor de umidade, seguido da pressão utilizada (Figura 3.20). Já a nomenclatura atribuída aos resultados obtidos em uma linha de sensores específica é denominada pelas informações de umidade e pressão e a respectiva posição na rampa conforme Figura 3.20.

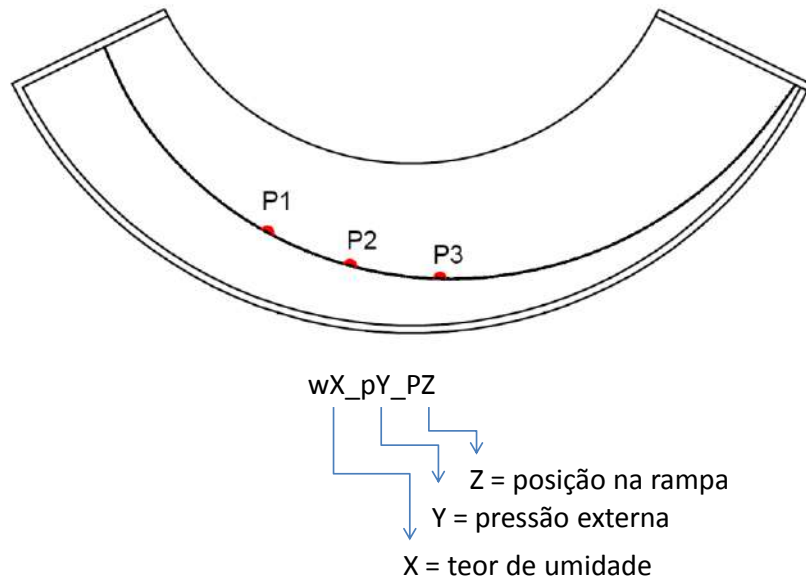


Figura 3.20 - Esquema da nomenclatura adotada

A Tabela 3.3 apresenta as principais características de cada um dos seis ensaios analisados na presente pesquisa. A faixa de umidades escolhida (85% a 100%) foi baseada nos ensaios de PARDO (2015), os quais indicaram ser esta a faixa de provável ocorrência de aquaplanagem.

Tabela 3.3 - Características das misturas utilizadas em cada ensaio

Ensaio	Umidade da mistura	Pressão externa (bar)
w100_p1.0	100%	1,0
w100_p0.8	100%	0,8
w90_p1.1	90%	1,1
w90_p0.9	90%	0,9
w90_p0.8	90%	0,8
w85_p1.1	85%	1,1

### 3.8 METODOLOGIA

Visto que a modelagem física centrífuga visa simular o momento posterior à ruptura do talude submarino, desde o início do fluxo de detritos até a disposição final do material carregado, a seguir são descritos em sequência um resumo dos procedimentos para a realização dos ensaios.

- Substituir a lixa da rampa a cada ensaio realizado, atentando para que seja realizada uma abertura na posição onde estarão instalados os transdutores, de modo a não interferir nos resultados da instrumentação;
- Os transdutores de poropressão devem ser previamente saturados devendo se tomar cuidado para que este processo de saturação seja mantido durante todo tempo até que o ensaio comece;
- Após as verificações preliminares, o tubo de lançamento é conectado e pode-se realizar o basculamento da centrífuga;
- O voo da centrífuga é iniciado com uma rotação de apenas 6 rpm, suficiente para o lançamento do contrapeso inicial (5 litros), referente a diferença de peso da caixa de ensaios e a caixa de contrapeso;
- Logo em seguida a centrífuga é acelerada até a frequência de 12,7 rpm (correspondentes a 40g) para a alimentação tanto da caixa de ensaios como da caixa de contrapeso. Os cálculos que envolveram a contabilidade de todos os itens de cada caixa revelaram a seguinte proporção de alimentação: a cada litro de água lançado na caixa de ensaios deve-se lançar meio litro na caixa de contrapeso. Essa etapa é realizada até atingir 8 litros na caixa de ensaios;
- Em paralelo à alimentação de água realiza-se o armazenamento da lama, previamente misturada com as partículas traçadoras. Nesta fase são retiradas três amostras da mistura para verificação da umidade;
- Com o reservatório de lama já acoplado, inicia-se a aquisição de dados, sendo então acionada uma luz que serve para sincronização das câmeras;
- Na sequência o sistema de pressão externa é acionado e realiza-se o lançamento da lama;
- Após o ensaio os solenoides são acionados e aguarda-se a drenagem total das caixas para realizar a parada da centrífuga e a limpeza da mesma.

Uma complementação da descrição acima será apresentada no capítulo seguinte.

# 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados de seis dos ensaios realizados, assim como a análise dos mesmos. Estes ensaios foram escolhidos com o objetivo de avaliar a influência do teor de umidade da mistura e da pressão externa utilizada. Os resultados dos ensaios permitiram definir, através da análise PIV, o perfil característico de velocidades nos casos de deslizamentos com ocorrência de aquaplanagem. A Tabela 4.1 apresenta as características dos ensaios analisados: pressão externa utilizada, umidade da mistura. Os valores de umidade aqui apresentados são nominais. As verificações de umidade realizadas durante os ensaios mostraram variações de cerca de 0,9% dos valores nominais.

Tabela 4.1 - Características dos ensaios e das misturas estudadas

Ensaio	Mistura			
	Pressão externa (bar)	Umidade da mistura	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (1/s)
w100_p1.0	1,0	100%	168,3	2,88
w100_p0.8	0,8	100%	164,3	2,73
w90_p1.1	1,1	90%	193,8	4,17
w90_p0.9	0,9	90%	194,0	4,06
w90_p0.8	0,8	90%	204,1	4,20
w85_p1.1	1,1	85%	236,3	4,68

A Tabela 4.1 apresenta também os valores de tensão de escoamento e viscosidade obtidos através de ensaios reológicos executados com as misturas utilizadas nos ensaios centrífugos. Vale ressaltar que a avaliação do comportamento reológico das misturas ensaiadas não faz parte do escopo desta dissertação. Assim sendo, os dados reológicos das misturas serão apenas brevemente discutidos no presente capítulo. As propriedades reológicas dos materiais ensaiados serão amplamente exploradas na tese de doutorado de HOTTA (2018) correlata a esta dissertação e que também está sendo desenvolvida pelo grupo de pesquisa de instabilidade de taludes submarinos da COPPE. Maiores detalhes a respeito dos ensaios reológicos são abordados no Anexo 02 deste trabalho.



No trabalho de PARDO (2015), os parâmetros que influenciam a ocorrência da aquaplanagem em *debris flow* submarinos foram verificados através da análise de 5 parâmetros: (a) imagens de vídeo; (b) comportamento da tensão total e da poropressão; (c) magnitude da pressão de estagnação e da tensão normal da massa deslizante; (d) magnitude da velocidade frontal e velocidade crítica do fluxo; (e) número densimétrico de Froude. No presente estudo, as análises da aquaplanagem foram baseadas nas análises das premissas (a) e (b) propostas por PARDO (2015), complementadas pela análise de velocidades pelo PIV e por dados de reologia das misturas, conforme abaixo: (a) análise das imagens, atribuindo a ocorrência de aquaplanagem ao levantamento do fundo e formação de cabeça na região frontal; (b) análise dos resultados obtidos nas medições dos transdutores de poropressão e tensão total; (c) as análises dos resultados anteriores foram então utilizados para definir, a partir das medidas de PIV, os perfis de velocidades característicos de fluxos de detritos submarinos com e sem a ocorrência de aquaplanagem.

## 4.2 IMAGENS E MEDIDAS DE POROPRESSÃO E TENSÃO TOTAL

### 4.2.1 Considerações preliminares

O objetivo principal da captura de imagens durante os ensaios foi a realização de uma análise qualitativa do fenômeno de aquaplanagem. O monitoramento através de câmeras de alta velocidade realizado durante os ensaios possibilitou a determinação do campo de velocidades através do sistema PIV. Além disso, as imagens possibilitaram verificar a formação, ou não, da cabeça de fluxo e o levantamento da mesma em relação ao fundo do canal. Neste item são apresentadas apenas as análises baseadas nas imagens obtidas a partir das imagens dos vídeos. Já os resultados do campo de velocidades, são apresentados posteriormente no item 4.3.

O comportamento do *debris flow* submarino também foi avaliado através da análise de sensores de poropressão e tensão total. Em todos ensaios executados, a aquisição de dados dos transdutores de poropressão e tensão total foi iniciada após as caixas de ensaio e contrapeso estarem cheias de água. O procedimento consistiu em sincronizar as câmeras após passados 30 segundos do início da aquisição de dados e então após 60 segundos do início da aquisição fazer o lançamento da lama na caixa de ensaio. A Figura 4.1 mostra um exemplo que engloba todo o processo de aquisição

de dados, onde as fases são representadas por: (1) início da aquisição de dados, (2) sincronização das câmeras e (3) lançamento da lama. No entanto os resultados dos transdutores serão apresentados somente a partir do tempo  $t = 60$  s a fim de adequar a escala dos gráficos ao objeto de estudo do presente trabalho.

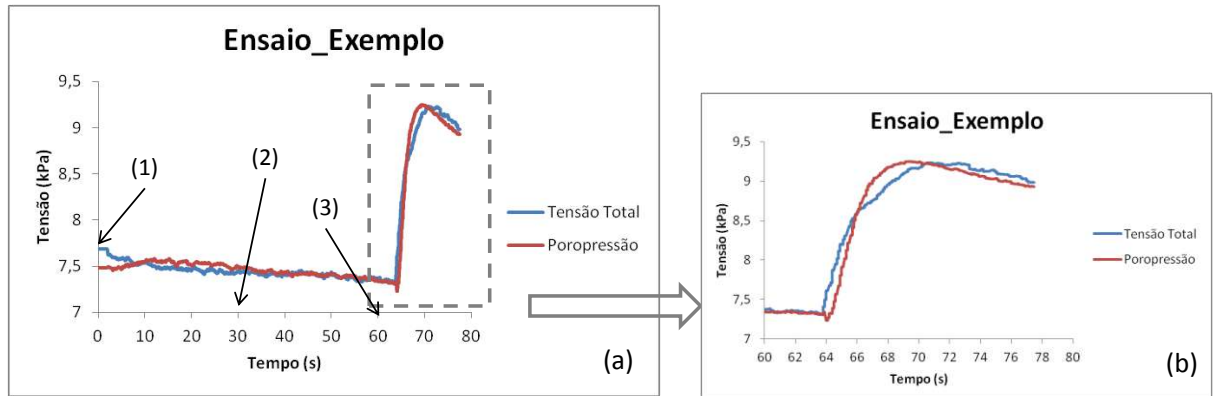


Figura 4.1 - Exemplo do comportamento dos transdutores (a) durante toda aquisição de dados (b) após  $t = 60$  s

Além disso, outro fato importante de ser mencionado é que o transdutor de poropressão, relativo à Posição 3, não apresentou bons resultados, provavelmente por terem ocorrido problemas na saturação do mesmo. No entanto, apesar do imprevisto, tal fato não foi prejudicial aos resultados do presente trabalho, uma vez que pela análise das imagens, apresentadas no item anterior, não foi constatada aquaplanagem em nenhum dos ensaios na Posição 3. Inclusive, em alguns ensaios, o fluxo nem mesmo chegou a atingir a posição deste transdutor. A Figura 4.2 mostra o comportamento do transdutor instalado na Posição 3 no ensaio w100\_p1.0. Observa-se que o transdutor de poropressão não estabilizou sua leitura ao longo do ensaio por não estar devidamente saturado. Em virtude deste problema os demais resultados do transdutor de poropressão da Posição 3 não serão aqui apresentados. Além disso, assim como na análise das imagens, os resultados relativos a Posição 4 também não são apresentados pelo fato de o fluxo não ter alcançado a instrumentação localizada nessa posição.

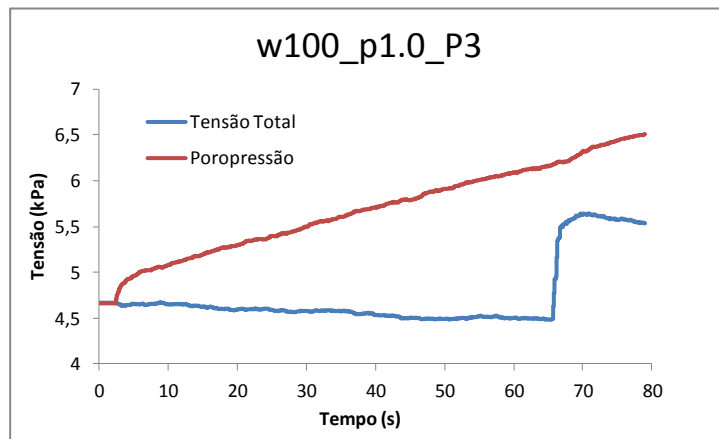


Figura 4.2 - Comportamento dos transdutores na Posição 3

A ocorrência ou não da aquaplanagem e o comportamento do fluxo são avaliados segundo as proposições de ILSTAD *et al.*, (2004) que propõem três situações principais para o comportamento das tensões: (1) os grãos estão em contato direto com a base e portanto as curvas de tensão total e poropressão, apesar de terem formatos semelhantes, apresentam valores distintos, (2) os valores de tensão total e poropressão são bastante próximos mas apresentam oscilações, que são características de fluxos fluidizados onde apesar de os grãos permanecerem em suspensão alguns ainda entram em contato com a base e (3) é observada coincidência nos valores de poropressão e tensão total, como se o fluxo se comportasse como um bloco rígido sobre uma camada de fluido. A terceira situação caracteriza a ocorrência de aquaplanagem.

Conforme mencionado anteriormente todos os ensaios possuem os mesmos percentuais de caulim e carvão, em uma proporção tal que caracterize o fluxo de solos argilosos (90% de caulim e 10% de carvão). As variáveis analisadas nos ensaios são, portanto, a pressão de lançamento e a umidade da mistura (Tabela 4.1). A pressão de lançamento do ensaio representa a simulação de algumas variáveis que promovem o início do movimento da massa de solo, como o volume de solo deslocado e a energia inercial do *debris flow*. Já a variação da umidade da mistura tem influência nos valores de tensão de escoamento e viscosidade do solo, fundamentais na compreensão do comportamento do *debris flow*.

#### 4.2.2 Ensaios com $w = 90\%$

A avaliação da influência da pressão de lançamento no comportamento do *debris flow* submarino foi feita primeiramente através da análise de três ensaios

realizados em misturas de solo com mesmo teor de umidade (90%), considerado intermediário para a faixa de valores analisada no presente trabalho, e com diferentes pressões de lançamento. As Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.6 apresentam os resultados obtidos para misturas com 90% de umidade e pressões de lançamento de 1,1, 0,9 e 0,8 bar, respectivamente. Na Figura 4.3, são apresentados os resultados da medidas de poropressão e tensão total e as imagens obtidas no ensaio w90\_p1.1 (com a maior energia de lançamento para a mistura com teor de umidade de 90%) nas três posições ao longo da caixa de ensaio, onde em (a) a instrumentação na posição P1 mostra o início da corrida (1° intervalo de tempo), em (b) a instrumentação na posição P2 representa o comportamento da fase intermediária do fluxo (2° intervalo de tempo) e em (c) a instrumentação da posição P3 mostra a fase final do escorregamento (3° intervalo de tempo).

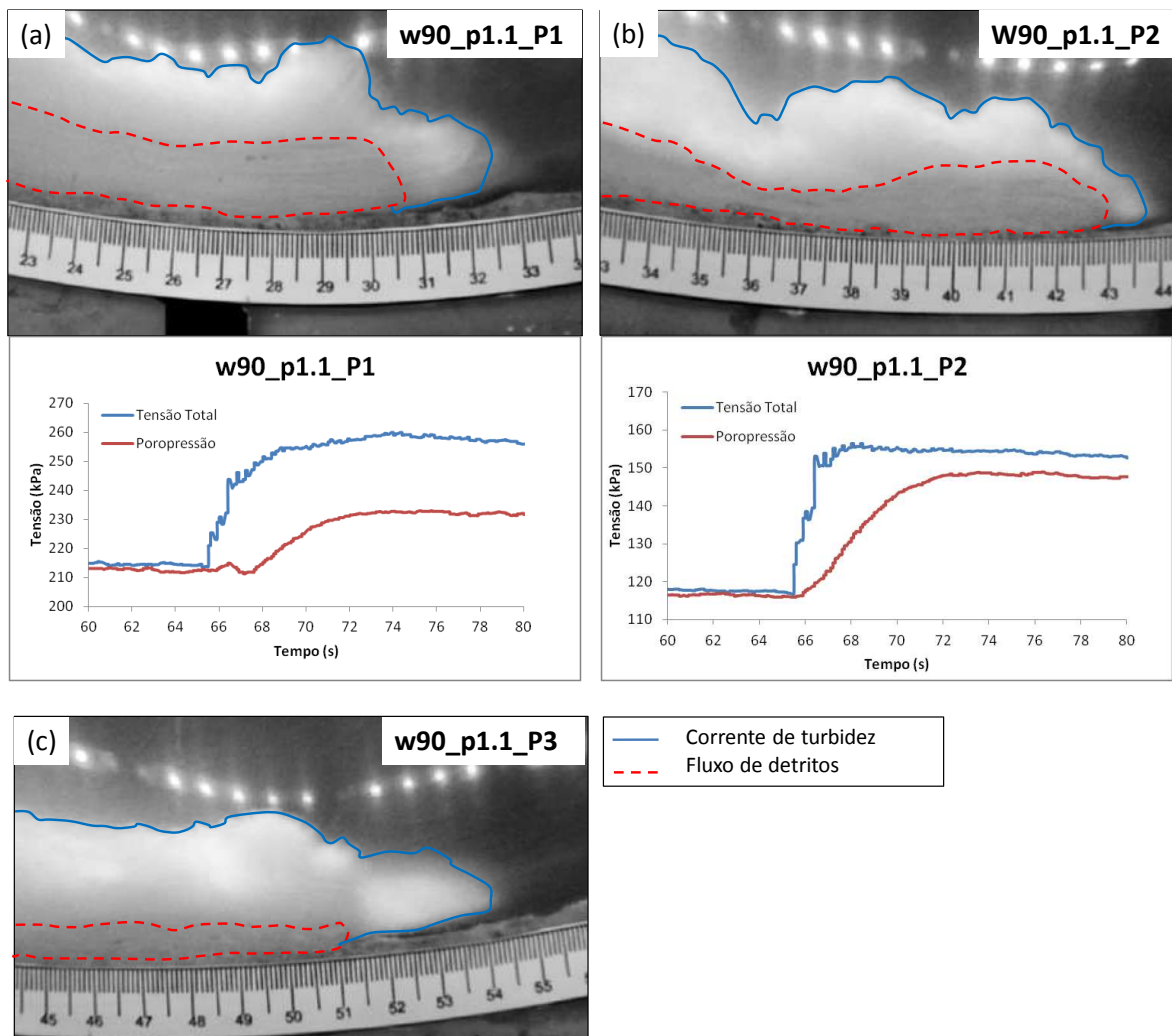


Figura 4.3 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w90\_p1.1 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

O ensaio w90\_p1.1 se caracteriza por apresentar a maior pressão dentre os ensaios com umidade de 90%. Analisando as imagens do ensaio w90\_p1.1, apresentadas na Figura 4.3, observa-se uma leve tendência de levantamento da cabeça de fluxo na Posição 1 (Figura 4.3a). No entanto, para esta tensão de escoamento da mistura a alta energia de lançamento não permitiu que a cabeça do fluxo se mantivesse formando a aquaplanagem. Na Posição 2 (Figura 4.3b) observar-se certa semelhança com o que é apresentado na literatura: a altura da região frontal é maior em relação ao corpo do fluxo e há uma distinção marcante entre o fluxo propriamente dito e a corrente de turbidez. Entretanto, pode se detectar também que a cabeça do fluxo "tombou", não permitindo a introdução de água na base do fluxo. Na Posição 3 (Figura 4.3c) observa-se que a lama já se misturou completamente com a água e, portanto, não é possível detectar uma clara distinção entre o fluxo e a corrente de turbidez.

Em relação ao comportamento da poropressão e tensão total observa-se que na Posição 1 (Figura 4.3a) as medidas foram bastante distintas e, portanto, não representam a ocorrência de aquaplanagem. Na Posição 2 (Figura 4.3b), pode se observar que, apenas ao final do deslizamento, as leituras de tensão total e poropressão apresentam medidas próximas e, portanto em concordância com as imagens também não caracterizam a ocorrência de aquaplanagem. O teor de umidade de 90% proporciona viscosidade e tensão de escoamento favorável para a ocorrência de aquaplanagem, no entanto a alta turbulência gerada pela utilização de uma alta pressão de lançamento fez com que as partículas do fluxo tocassem a base e as curvas apresentassem formato semelhante, porém valores distintos.

As Figura 4.4 e Figura 4.6 avaliam a ocorrência de aquaplanagem através do comportamento da poropressão e tensão total e das imagens obtidas nos ensaios w90\_p0.9 e w90\_p0.8, respectivamente, com menores valores de pressão de lançamento para a mistura com teor de umidade de 90%.

O ensaio w90\_p0.9 (Figura 4.4) apresenta mesmo teor de umidade que o apresentado anteriormente (w90\_p1.1) e uma menor pressão de lançamento. As medidas de poropressão e tensão total e as imagens obtidas nas três posições são apresentadas: na Figura 4.4a que correspondente ao início do fluxo, e na Figura 4.4b e Figura 4.4c as fases intermediária e final do fluxo, respectivamente.

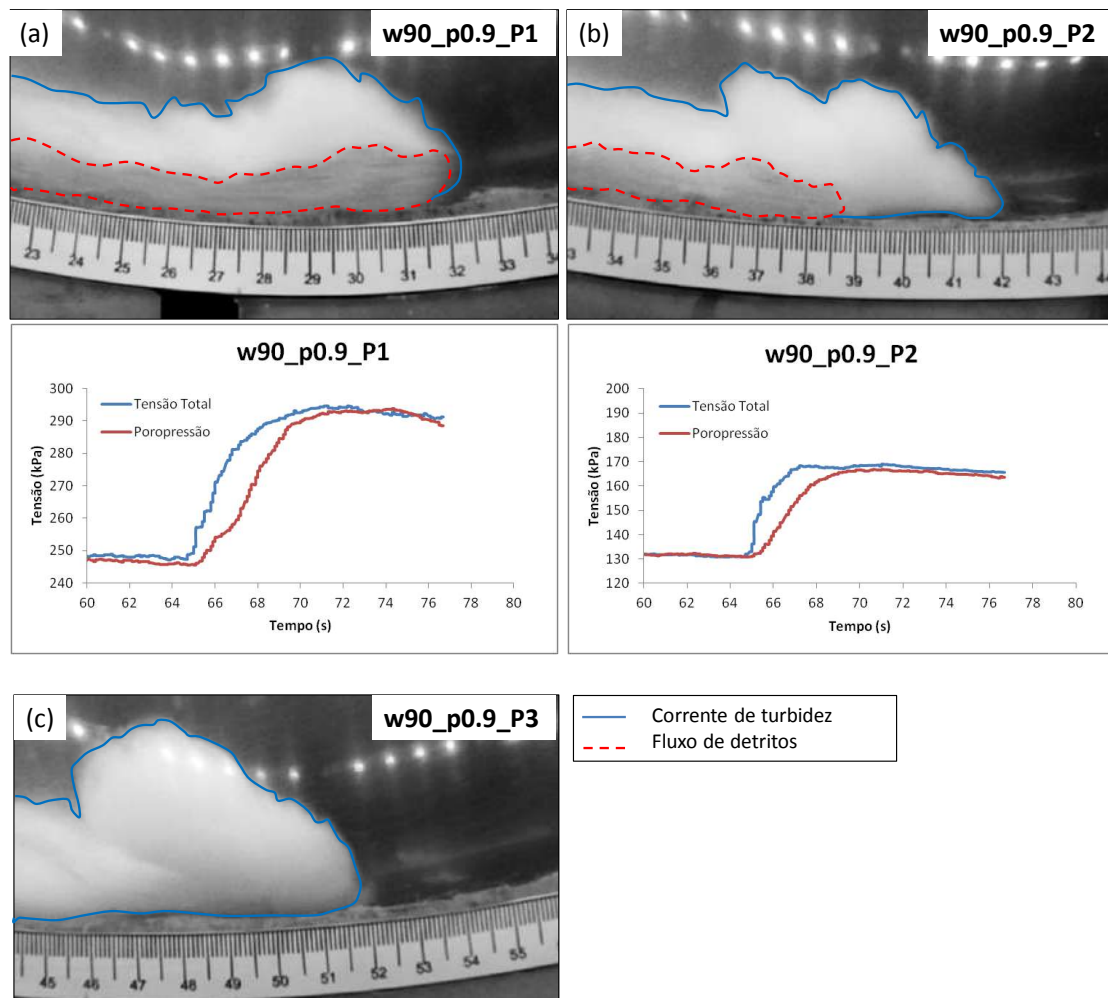


Figura 4.4 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w90\_p0.9  
 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

Na Posição 1 do ensaio w90\_p0.9 (Figura 4.4a) pode ser observada uma forte semelhança com o comportamento de fluxos de detritos ricos em argila com ocorrência de aquaplanagem apresentado por ILSTAD *et al.* (2004) (Figura 4.5). Na região frontal do fluxo observa-se a formação da cabeça de fluxo e o levantamento da mesma, assim como o estrangulamento do corpo de fluxo. Embora a literatura sugira que a cabeça do fluxo, em casos de aquaplanagem, seja de 2 a 3 vezes maior que o corpo do fluxo, na Figura 4.4a observa-se que a região frontal do fluxo é cerca de 1,7 vezes maior que a região de estrangulamento do fluxo. Além disso é observada uma clara distinção entre o fluxo e a corrente de turbidez. A umidade de 90%, associada a uma menor pressão de lançamento da mistura, foram ideais para a formação e manutenção da cabeça de fluxo, permitindo também que uma fina camada de lama de baixa viscosidade se introduzisse na região frontal, caracterizando o processo de aquaplanagem. Em função de uma menor pressão de lançamento, em relação ao

ensaio w90\_p1.1, a cabeça do fluxo já não é mais observada nas Posições 2 e 3. Inclusive na Posição 3 (Figura 4.4c) observa se apenas a presença de corrente de turbidez.

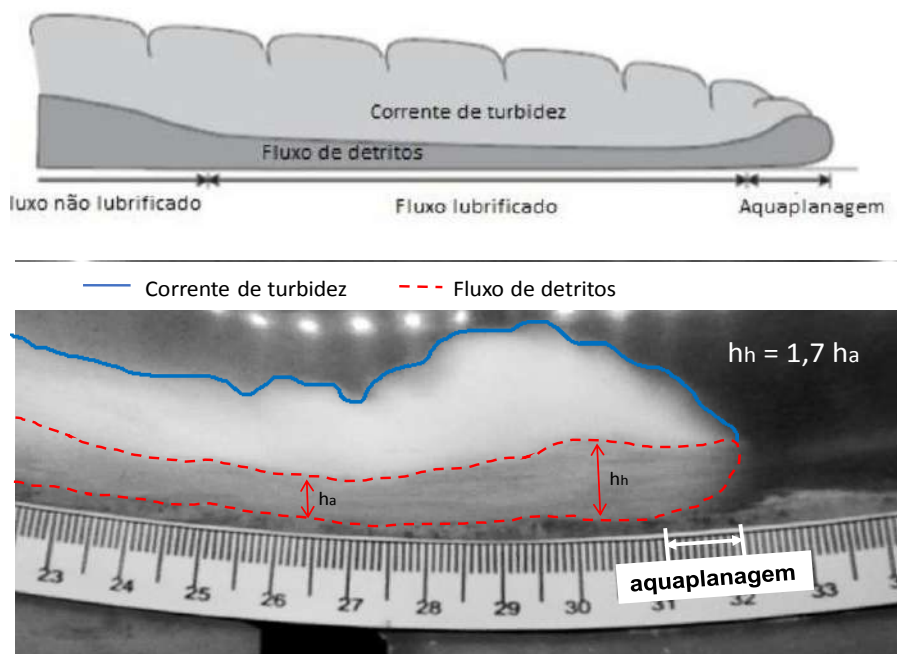


Figura 4.5 - Semelhança de comportamento do fluxo de detritos do Ensaio w90\_p0.9 e do apresentado na literatura por ILSTAD *et al.* (2004)

Já em relação ao comportamento da poropressão e tensão total, pode se observar que na Posição 1 (Figura 4.4a) do ensaio w90\_p0.9, as leituras dos transdutores se igualam, este comportamento é muito similar ao apresentado por ILSTAD *et al.* (2004) (Figura 2.7c), onde é mostrada a massa deslizando sob uma camada de fluido, fenômeno que define, segundo a literatura, a ocorrência da aquaplanagem. Como as medidas de tensão total e poropressão da Posição 2 (Figura 4.4b) são próximas é possível afirmar que uma fina camada de lama de baixa viscosidade tenha se introduzido na base do fluxo, mas que não tenha ocorrido a formação da cabeça de fluxo, como ficou evidenciado na análise das imagens.

O ensaio w90\_p0.9 mostrou que a viscosidade e tensão de escoamento para misturas com 90% de umidade e a diminuição na pressão de lançamento, em relação ao ensaio anterior, favorecem a ocorrência da aquaplanagem e modificam completamente o comportamento do fluxo. Enquanto que no ensaio anterior as partículas de solo tocavam a base, no ensaio w90\_p0.9 o fluxo tem tendência de se comportar como um bloco rígido deslizando sobre uma camada de fluido.

O ensaio w90\_p0.8 (Figura 4.6) apresenta mesmo teor de umidade que os ensaios w90\_p1.1 e w90\_p0.9. Entretanto, foi realizado com pressão de lançamento de 0,8 bar (a menor dos três valores ensaiados), com objetivo de avaliar a influência da energia de lançamento. As fases do fluxo estão representadas na Figura 4.6 por: (a) posição P1 mostrando o início da corrida (1º intervalo de tempo), (b) posição P2 representando o comportamento da fase intermediária do fluxo (2º intervalo de tempo) e (c) posição P3 mostrando a fase final do escorregamento (3º intervalo de tempo).

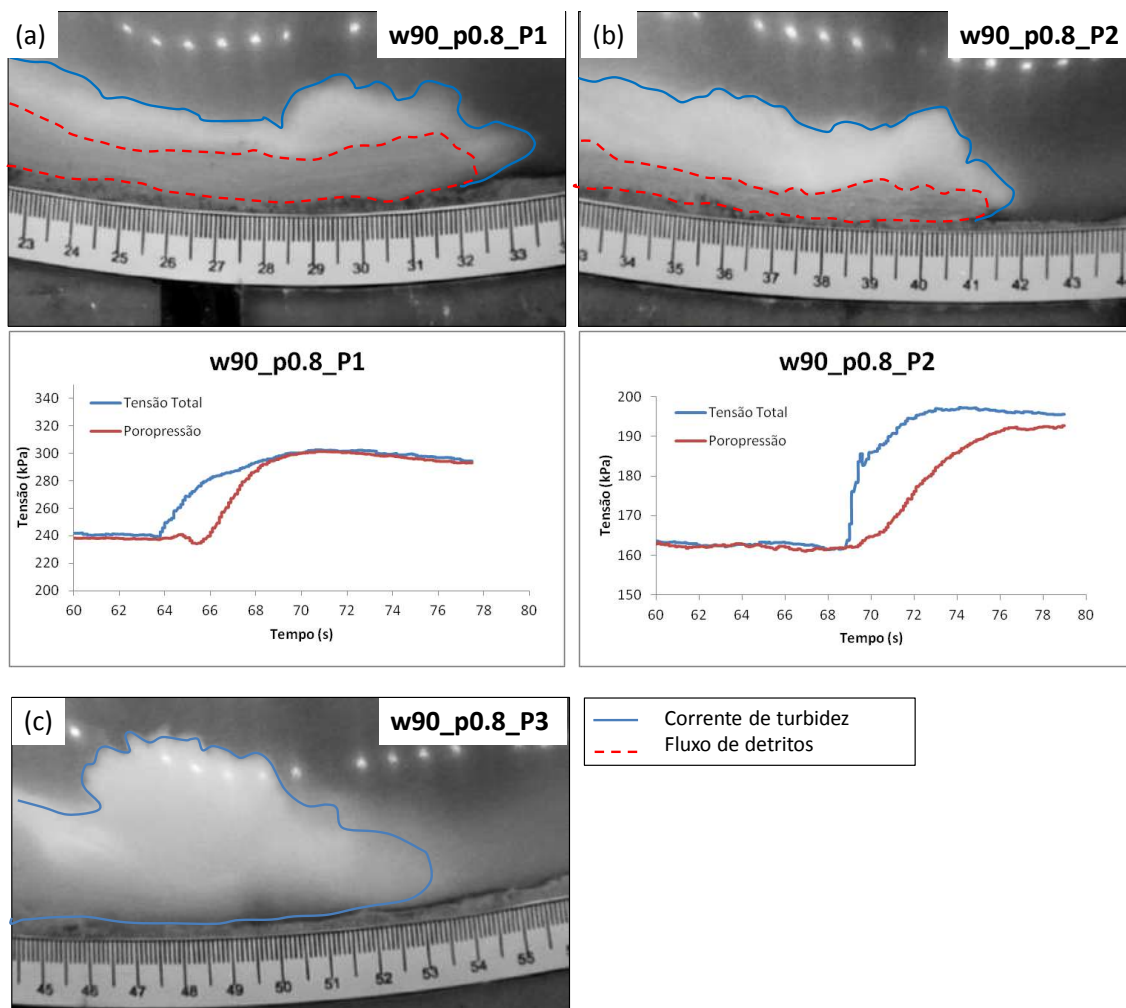


Figura 4.6 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w90\_p0.8  
(a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

De todos os ensaios realizados, o ensaio w90\_p0.8, na Posição 1 (Figura 4.6a), é o que mostra mais claramente o levantamento da frente do fluxo e a possível introdução de uma fina camada de lama de baixa viscosidade na base da região frontal do fluxo. Em concordância com a análise visual, a Posição 1 do ensaio



w90\_p0.8 apresentou medidas bem similares de tensão total e poropressão, o que segundo a literatura caracteriza uma massa deslizante sob uma camada de fluido e define a ocorrência da aquaplanagem. Na Figura 4.6b pode se observar uma frente bem definida constituída por um fluxo denso e um fluxo em suspensão e uma deformação frontal da cabeça do fluxo de detritos de forma tal, que na Posição 2 (Figura 4.6b) a espessura da cabeça frontal é maior que a espessura média do escorregamento em cerca de 1,7 a 1,8 vezes. Em concordância com a análise das imagens pode se observar também que apesar de a Posição 2 (Figura 4.6b) apresentar distinção de tamanho da região frontal em relação ao corpo, não ocorre a introdução da fina camada de água na base do fluxo, como mostram os resultados das medidas de tensão total e poropressão. Dessa forma pode se inferir que a aquaplanagem ocorreu apenas na Posição 1 do ensaio w90\_p0.8.

#### 4.2.3 Ensaios com $w = 100\%$

A influência da energia de lançamento é avaliada também para o caso de misturas com alto teor de umidade (100%), já que para umidade de 90% foi observada que a energia de lançamento influencia a ocorrência da aquaplanagem. Para tanto serão analisados a seguir os ensaios nas misturas com 100% de umidade, w100\_p1.0 e w100\_p0.8, apresentados na Figura 4.7 e Figura 4.8 com pressões de lançamento de 1,0 e 0,8 bar, respectivamente. Na Figura 4.7, são mostradas as imagens obtidas e os resultados dos transdutores de poropressão e tensão total no ensaio w100\_p1.0 nas três posições ao longo da caixa de ensaio, onde em (a) a posição P1 mostra o início da corrida (1° intervalo de tempo), em (b) a posição P2 representa o comportamento da fase intermediária do fluxo (2° intervalo de tempo) e em (c) a posição P3 mostra a fase final do escorregamento (3° intervalo de tempo).

No ensaio w100\_p1.0 (Figura 4.7), caracterizado por alto teor de umidade, foi possível evidenciar que a cabeça frontal não é tão definida como nos ensaios com umidades menores, como 90%. Observa-se a predominância de corrente de turbidez nas Posições 2 (Figura 4.7b) e 3 (Figura 4.7c) e não é possível detectar variação de altura ao longo do fluxo e/ou formação de cabeça na região frontal. Fluxos com alto teor de umidade possuem uma frente de onda fluidizada com comportamento turbulento que permite que a água se incorpore ao fluxo formando as chamadas correntes de turbidez, predominantes no ensaio w100\_p1.0 (Figura 4.7).

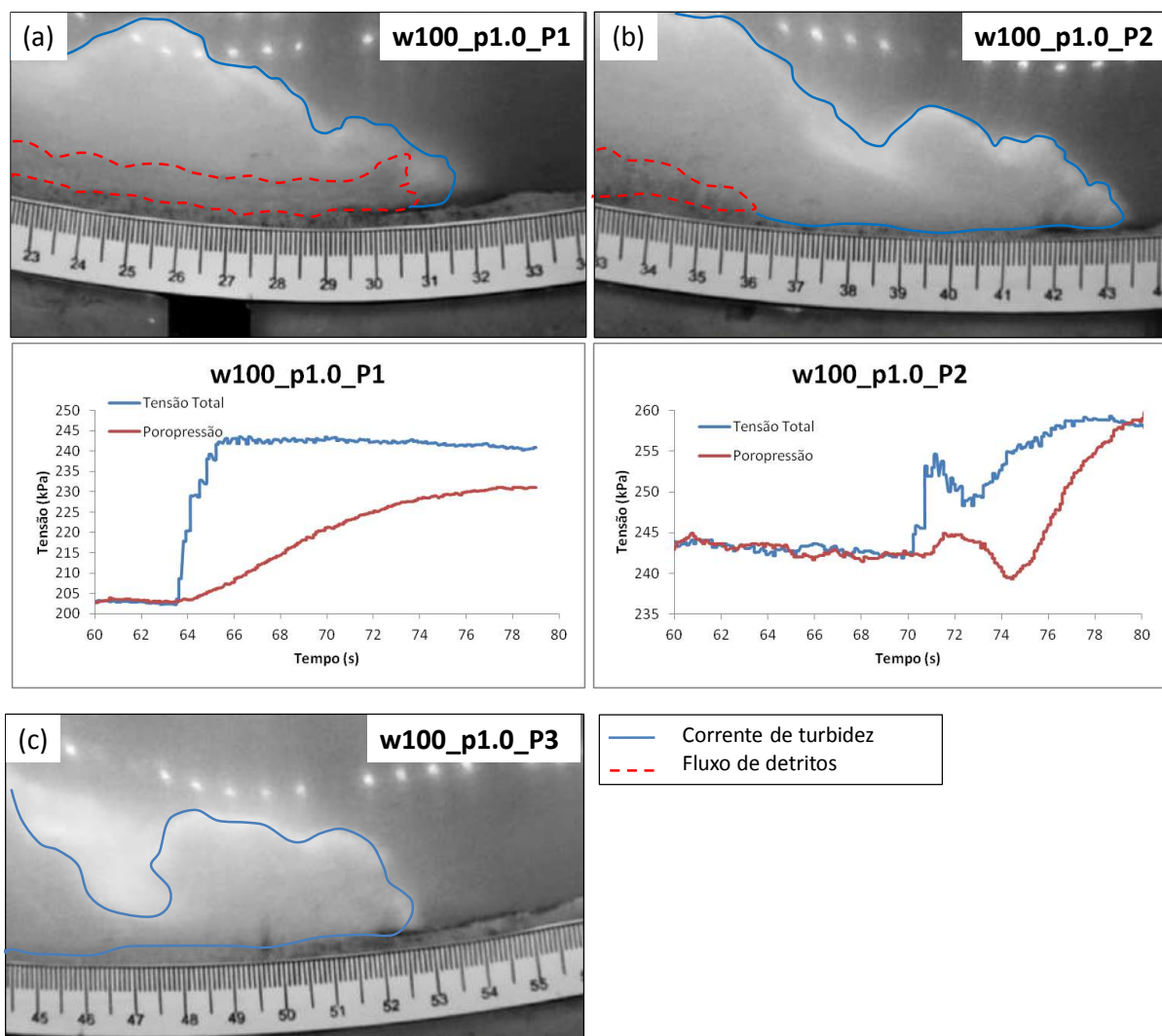


Figura 4.7 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w100\_p1.0 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

O aumento do teor de água de 90% para 100% proporcionou reduções significativas na tensão de escoamento e principalmente na viscosidade nas misturas ensaiadas, conforme mostrado na Tabela 4.1. Como pode ser observado na Figura 4.7a as medidas de poropressão e tensão apresentaram valores bastante distintos e nenhum momento foi evidenciada a ocorrência de aquaplanagem na Posição 1. Além disso, a redução nos parâmetros reológicos das misturas associada a uma elevada pressão de lançamento proporcionou um comportamento bastante caótico nos resultados de poropressão e tensão total, como pode ser observado na Figura 4.7b.

A Figura 4.8, avalia a ocorrência de aquaplanagem através das imagens e medidas de poropressão e tensão total obtidos no ensaio w100\_p0.8, que apresenta mesmo teor de umidade que o apresentado anteriormente (w100\_p1.0) e menor

pressão de lançamento para misturas com alto teor de umidade (100%). As imagens e leituras dos transdutores obtidas nas três posições são apresentadas: na Figura 4.8a que corresponde ao início do fluxo, enquanto que as Figura 4.8b e Figura 4.8c representam as fases intermediárias e finais do fluxo respectivamente.

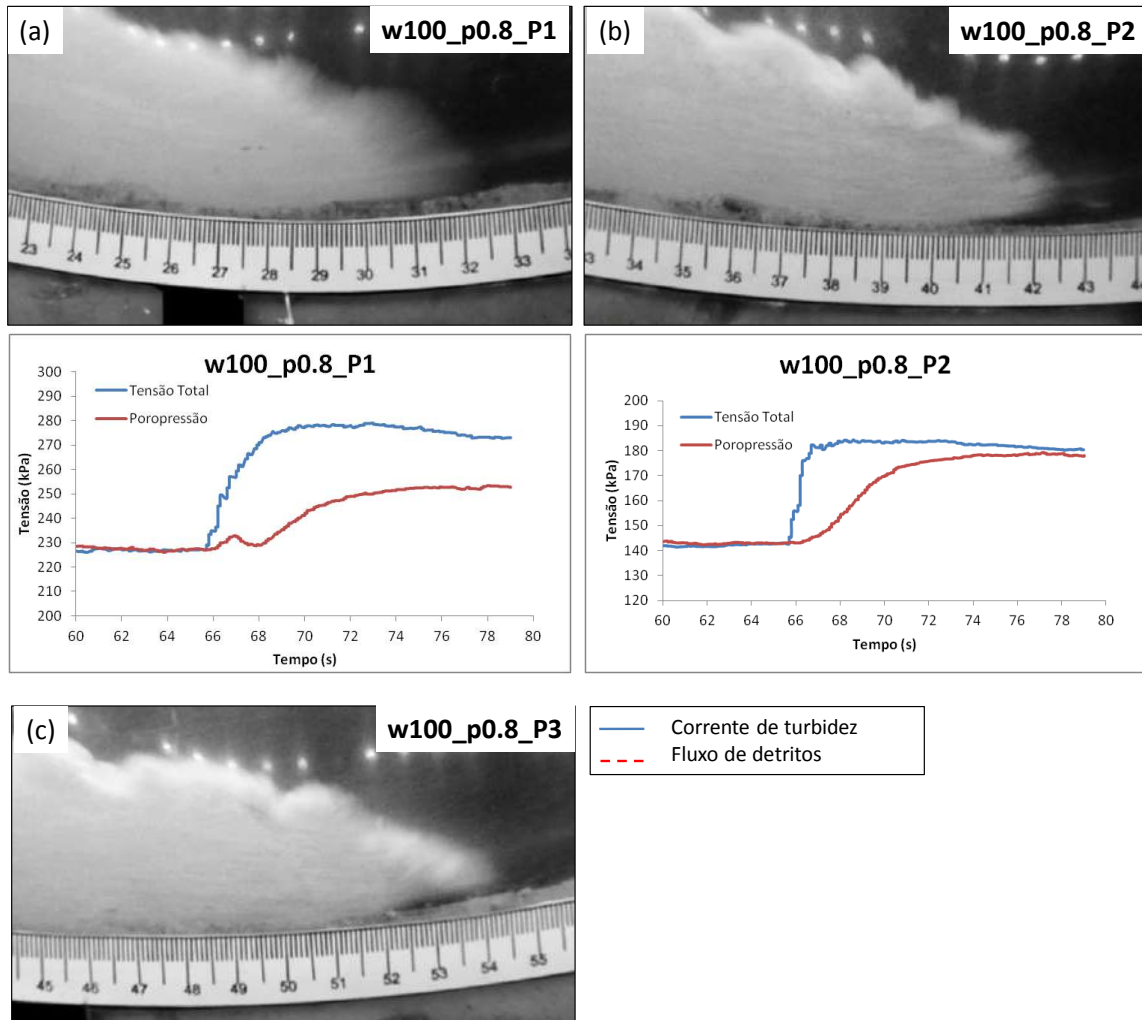


Figura 4.8 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w100\_p0.8 (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

Enquanto que no ensaio w100\_p1.0, as posições P1 e P2 se caracterizaram por apresentar fluxo composto basicamente por corrente de turbidez, o ensaio w100\_p0.8 (Figura 4.8) apresentou um formato composto por fluxo e corrente de turbidez em todas as posições. Apesar disso, observa-se que não há uma distinção aparente entre o fluxo propriamente dito e a corrente de turbidez, como é observado na Posição 1 do ensaio w100\_p1.0 (Figura 4.7a). Em relação ao ensaio w100\_p1.0, o ensaio w100\_p0.8, principalmente na posição intermediária (Figura 4.8b), apresenta

uma tendência maior, porém insuficiente, à formação da cabeça de fluxo. Enquanto que no ensaio anterior a alta pressão de lançamento fez com que o fluxo se transformasse basicamente em corrente de turbidez, o ensaio w100\_p0.8 mostra que uma diminuição na pressão de lançamento favorece a formação da cabeça de fluxo, mas ainda assim não é suficiente para a formação da aquaplanagem. Dessa forma, para fluxos com teor de umidade altos, o fator predominante para a não ocorrência da aquaplanagem é a baixa tensão de escoamento dos mesmos. Ou seja, para fluxos com alto teor de umidade, a alteração da energia de lançamento, apesar de melhorar as condições para a formação da cabeça de fluxo, promove uma frente de onda fluidizada com comportamento turbulento que permite que a água do ambiente se incorpore ao fluxo fazendo com que não haja distinção clara entre o fluxo e a corrente de turbidez.

A redução da tensão de escoamento e viscosidade provocada pela redução do teor de água das misturas com umidade 100%, em relação as misturas de 90%, mostraram no ensaio anterior (w100\_p1.0) que essa alteração acarreta mudanças significativas no comportamento do fluxo. No entanto esse comportamento distinto poderia estar associado a alta pressão de lançamento. Nesse sentido no ensaio w100\_p0.8 é verificado se o parâmetro pressão de lançamento é realmente determinante na formação de um fluxo distinto. Observa-se que o ensaio w100\_p0.8 (Figura 4.8), não apresentou evidências de aquaplanagem em nenhuma das posições. É observado então que independentemente da pressão de lançamento, fluxos com alto teor de água não possuem tendência de aquaplanagem. Devido ao alto teor de umidade, o fluxo apresenta uma maior tendência de interagir com a água ambiente e apresentar comportamento semelhante ao apresentado por ILSTAD *et al.* (2004) como mostrado na Figura 2.7a em que o fluxo de detritos está em contato constante com o leito marinho.

#### 4.2.4 Ensaio com $w = 85\%$ e avaliação da influência da variação da umidade

A avaliação da influência da umidade do solo, e conseqüentemente da viscosidade e tensão de escoamento, no comportamento do *debris flow* submarino foi feita fixando dois valores de pressão de lançamento:  $p = 1,1$  bar, considerada uma alta energia de lançamento, e  $p = 0,8$  bar que corresponde a fluxos que envolvem quantidades menores de energia. A análise da influência da umidade para fluxos envolvendo grandes quantidades de energia é realizada comparando os ensaios

w85\_p1.1 e w90\_p1.1. Enquanto que para fluxos lançados com baixas pressões utilizou-se a comparação dos ensaios w90\_p0.8 e w100\_p0.8.

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados das imagens e leituras de poropressão e tensão total obtidas para o ensaio w85\_p1.1 com a mistura de 85% de umidade e valores de pressão de lançamento de 1,1 bar. As várias fases do ensaio w85\_p1.1 são mostradas na Figura 4.9 e organizadas da seguinte forma: (a) a posição P1 mostra o início da corrida (1° intervalo de tempo), em (b) a posição P2 representa o comportamento da fase intermediária do fluxo (2° intervalo de tempo) e em (c) a posição P3 mostra a fase final do escorregamento (3° intervalo de tempo). A análise deste ensaio permite avaliar a influência da viscosidade e tensão de escoamento para misturas que foram lançadas com altas pressões, que é o caso dos ensaios w90\_p1.1 e w85\_p1.1.

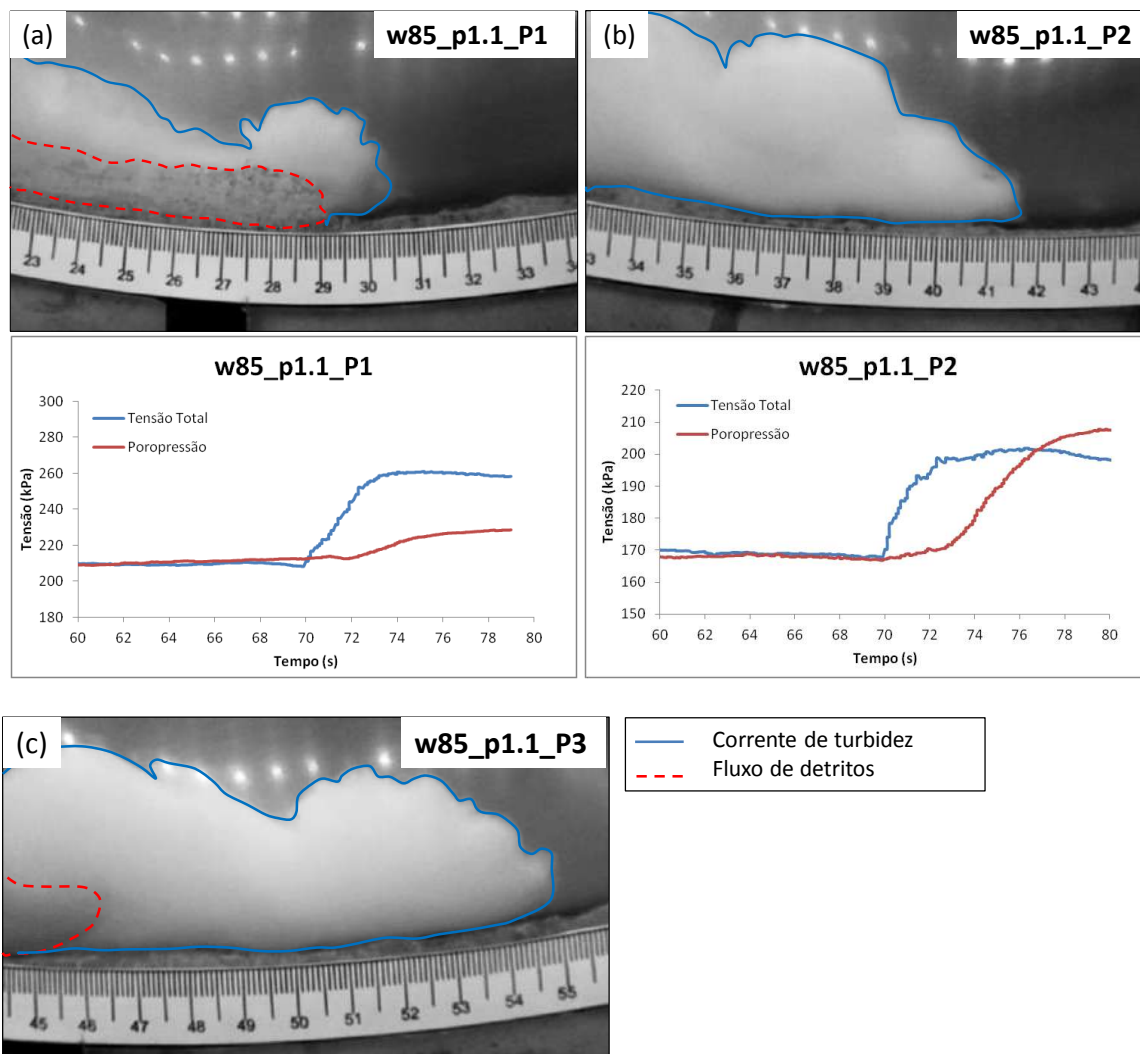


Figura 4.9 - Vista lateral e medidas de tensão total e poropressão do ensaio w85\_p1.1  
(a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

O ensaio w85\_p1.1, apresentado na Figura 4.9, foi realizado com uma alta pressão de lançamento. Entretanto, o baixo teor de umidade e, conseqüentemente, a elevada tensão de escoamento e alta viscosidade não permitiram que o fluxo se desenvolvesse e muito menos que fosse observada aquaplanagem. Tanto que nas Posições 2 e 3 (Figura 4.9b e Figura 4.9c respectivamente) o fluxo é composto predominantemente por corrente de turbidez. Em comparação com o ensaio w90\_p1.1, que foi realizado com mesma pressão, observa-se que pequenas alterações no teor de umidade, no caso de apenas 5%, são suficientes para alterar completamente o comportamento do fluxo.

Por fim, a avaliação da influência do teor de umidade para fluxos lançados com pressões baixas é realizada comparando os ensaios w90\_p0.8 e w100\_p0.8. Analisando as Figura 4.6 e Figura 4.8 observa-se uma enorme diferença, em termos de comportamento do fluxo, quando ocorre a variação da umidade. Conforme observado na Figura 4.6, o levantamento da frente do fluxo e a possível introdução de uma fina camada de lama de baixa viscosidade na base da região frontal do fluxo é claramente observado na Posição 1 do ensaio w90\_p0.8 (Figura 4.6a), além de ser detectado que a espessura da cabeça frontal é maior que a espessura média do escorregamento na Posição 2 (Figura 4.6b). Enquanto que o ensaio w90\_p0.8 apresenta todas as evidências de ocorrência de aquaplanagem, uma alteração na umidade de 90% para 100%, do ensaio w90\_p0.8 para o w100\_p0.8, modificou completamente a aparência do fluxo a ponto de que para o caso de fluxos lançados com 0,8 bar e  $w = 100\%$  não é possível distinguir o fluxo propriamente dito da corrente de turbidez.

O ensaio w85\_p1.1 que foi lançado sob mesma pressão que o ensaio w90\_p1.1, mas com uma diminuição de 5% no teor de umidade apresentou medidas bem distintas de tensão total e poropressão, como pode ser observado na Figura 4.9a. Particularmente na Posição 2 o material apresentou comportamento típico de fluxos de detritos com características insuficientes para resistir a tensão de cisalhamento frontal. Quando esse tipo de material é dissolvido e misturado com água, produz aproximadamente as mesmas leituras de tensão total e poropressão em alguns instantes, como é o caso da Figura 4.9b, , mas diferente dos casos nos quais se comprovou a aquaplanagem (e.g., Figura 4.4).

De maneira geral os resultados dos ensaios analisados no presente item apresentaram propriedades características de fluxos submarinos, conforme apresentado pela literatura. Foi identificada forma difusa, geração de corrente de

turbidez e comportamento turbulento com formação de vórtices. Além disso a composição do fluxo, proposta por BREIN *et al.* (2007) (Figura 2.10b), também foi observada em grande parte dos ensaios: uma primeira camada próxima ao fundo, outra intermediária com aspecto de fluído e no topo corrente de turbidez composta de sedimentos finos.

### 4.3 PERFIS DE VELOCIDADES HORIZONTAIS FRONTAIS

#### 4.3.1 Considerações preliminares

Neste item são apresentadas as análises realizadas através da Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Esta técnica de medição de velocidades não intrusiva e quantitativa, consiste em comparar imagens digitais capturadas em diferentes instantes de tempo, de forma a medir o deslocamento entre um par de imagens. Após o processamento das imagens no software PIV são obtidos os perfis de velocidades em qualquer região de interesse ou ao longo de uma linha qualquer (Figura 4.10). Como o objetivo do presente trabalho é definir o perfil de velocidades característico de fluxos com ocorrência de aquaplanagem e visto que este evento ocorre na região frontal do fluxo, apenas os perfis de velocidades horizontais na região frontal do fluxo serão analisados. A Figura 4.10 mostra o resultado obtido do processamento no software PIV para o ensaio w90\_p0.8. Pode se observar que os vetores da região frontal mostram claramente uma tendência de levantamento da cabeça de fluxo como demonstrado nos perfis a seguir. Além disso os vetores verdes representam a leitura original do *software*, enquanto que os vetores vermelhos e alaranjados são obtidos por interpolação de resultados.

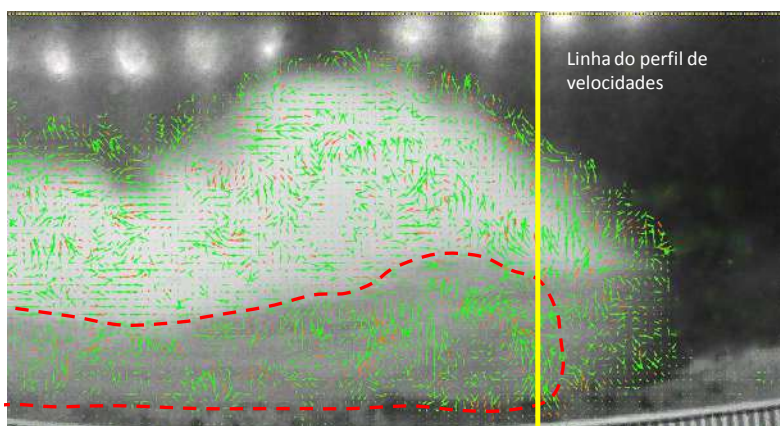


Figura 4.10 - Resultado da análise PIV para o ensaio w90\_p0.8

Nas figuras a seguir são apresentados os perfis de velocidades horizontais de cada um dos ensaios analisados. Como o objetivo do presente trabalho é definir as principais diferenças nos perfis de velocidade para fluxos com e sem ocorrência de aquaplanagem e como as evidências deste fenômeno ter ocorrido foram baseadas nas análises do item 4.2, os resultados deste item estão organizados da seguinte forma: os primeiros três ensaios (w100\_p1.0, w100\_p0.8, w85\_p1.1) apresentarão os perfis de velocidade para fluxos sem aquaplanagem, o quarto ensaio apresentará o perfil resultante de um ensaio em que apenas uma das análises apresentou aquaplanagem (w90\_p1.1) e por último são apresentados os perfis dos dois ensaios que apresentaram aquaplanagem (w90\_p0.9 e w90\_p0.8).

#### 4.3.2 Ensaios sem ocorrência de aquaplanagem

Segundo BREIN *et al.*, (2007) para um *debris flow* submarino que não apresenta aquaplanagem, o perfil de velocidades deve apresentar valores baixos na fronteira entre o *debris flow* e a corrente de turbidez e na base do fluxo, e velocidade máxima no meio do *debris flow* (formando um perfil parabólico) (Figura 2.11).

A Figura 4.11 apresenta os perfis de velocidades para o ensaio w100\_p1.0 para três posições ao longo da caixa de ensaios: (a) início do fluxo, (b) posição intermediária e (c) final do fluxo. É importante ressaltar aqui que o ensaio w100\_p1.0 foi realizado com umidade (100%) e pressão de lançamento (1 bar), ambas consideradas altas, segundo a faixa de valores analisadas no presente trabalho, e que tanto as análises das imagens quanto as dos transdutores de poropressão e tensão total não mostraram evidências de ocorrência de aquaplanagem.



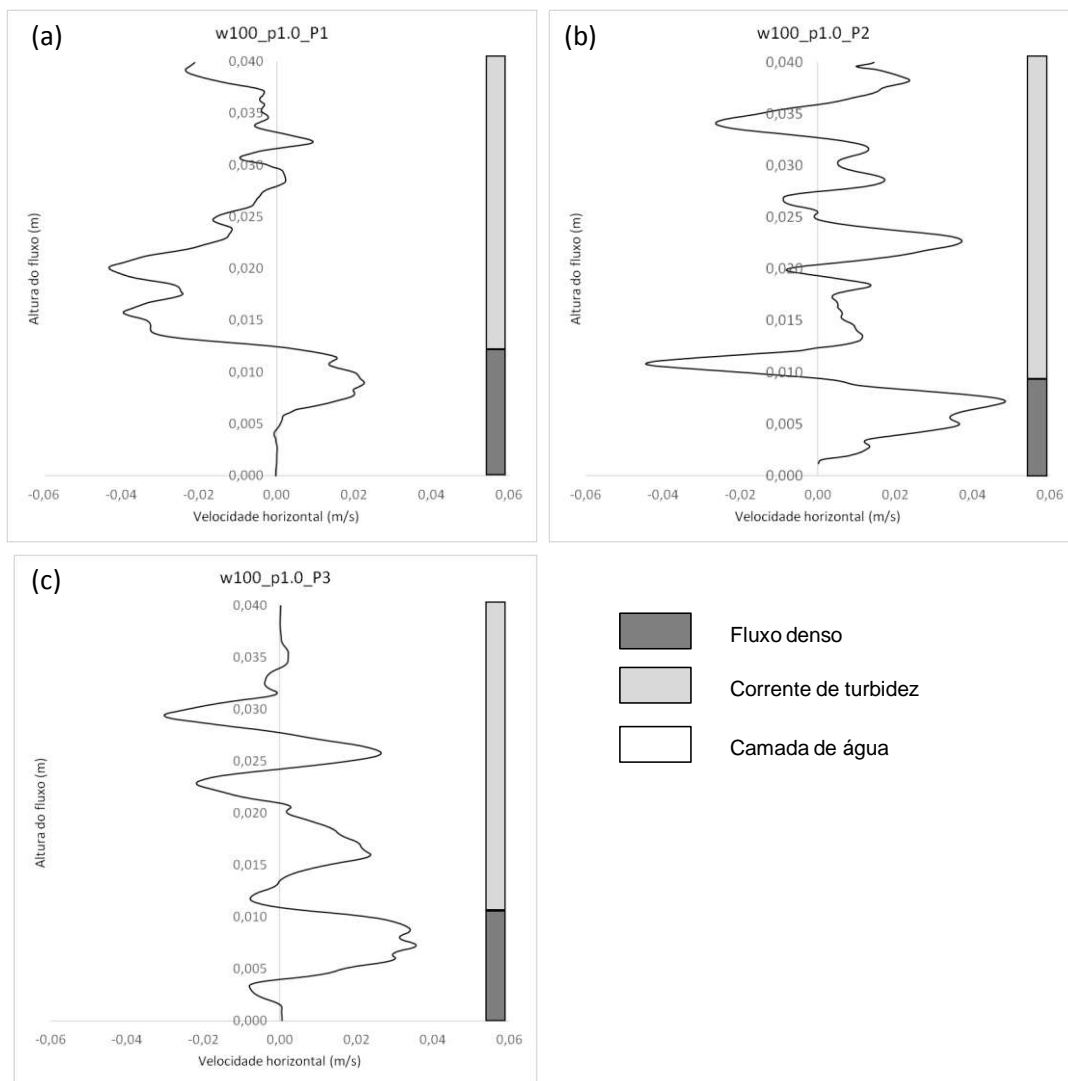


Figura 4.11 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w100\_p1.0 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

Conforme observado na Figura 4.11, o ensaio w100\_p1.0 apresentou características de fluxos de detritos submarinos sem aquaplanagem em todas as posições: velocidades menores na base, aumentando até um valor máximo e retornando a valores menores na transição entre o fluxo propriamente dito e a corrente de turbidez. Além disso, de acordo com o perfil teórico de fluxos de detritos submarino, foi observado um perfil parabólico no corpo do fluxo. Já para a corrente de turbidez, em função da grande presença de finos e do seu comportamento turbulento, não é possível definir um comportamento padrão. Dessa forma o perfil de velocidades encontrado no ensaio w100\_p1.0 corrobora com as análises obtidas através dos sensores e das imagens evidenciando a não ocorrência da aquaplanagem.

A Figura 4.12 apresenta os perfis de velocidades para o ensaio w100\_p0.8 para três posições ao longo da caixa de ensaios: (a) início do fluxo, (b) posição intermediária e (c) final do fluxo. O ensaio w100\_p0.8 foi realizado com umidade alta (100%) e pressão de lançamento (0,8 bar) baixa, segundo a faixa de valores analisadas no presente trabalho, e tanto as análises das imagens quanto as dos transdutores de poropressão e tensão total não mostraram evidências de ocorrência de aquaplanagem.

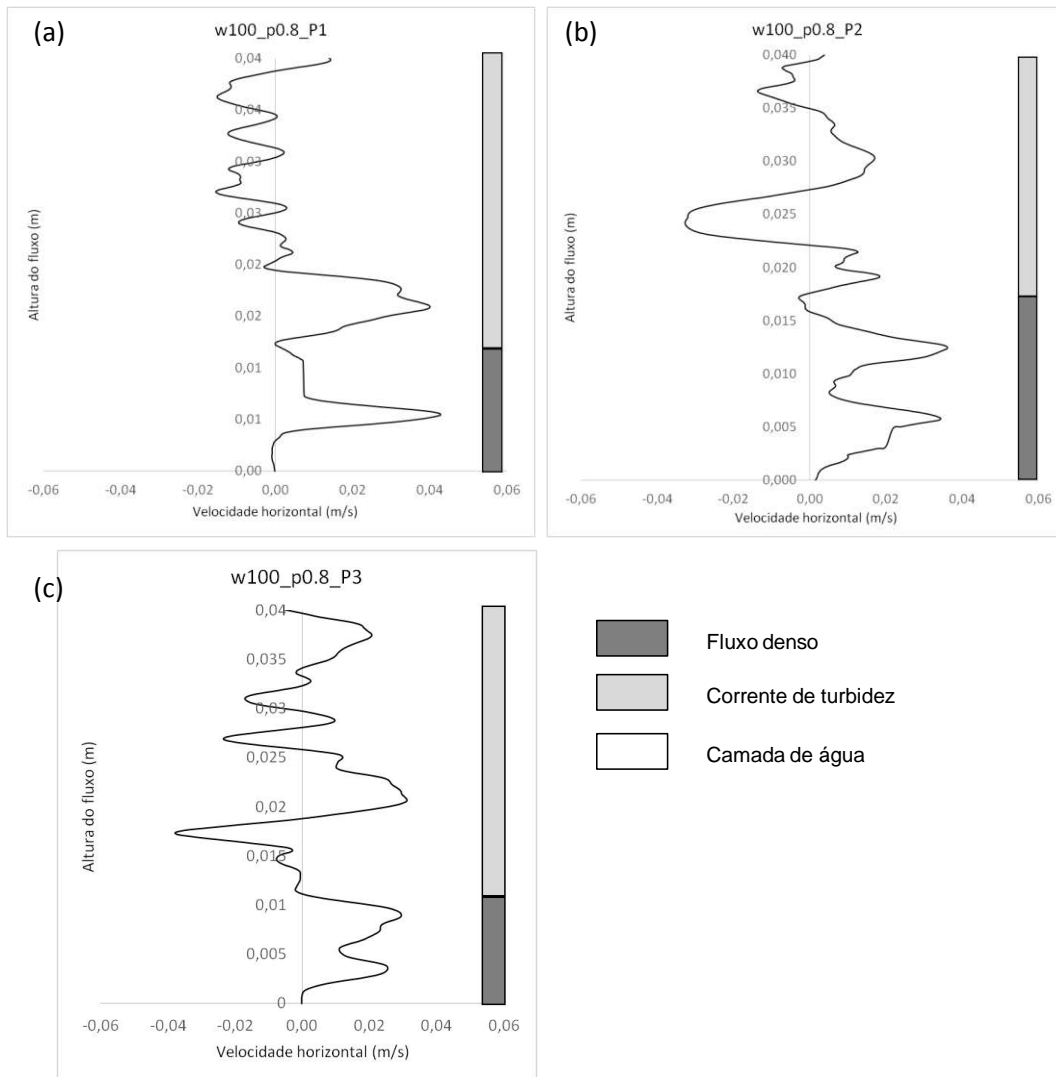


Figura 4.12 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w100\_p0.8 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

Observa-se que com exceção da Figura 4.12a, relativa à posição 1 da caixa, as demais posições do ensaio w100\_p0.8, apesar de apresentarem valores menores próximos a base e na transição do fluxo para a corrente de turbidez, apresentaram dois pontos de máximo na região de fluxo denso, enquanto que a literatura propõe um

único máximo formando um perfil parabólico. Já a posição 1 (Figura 4.12a) apresentou perfil de velocidades característico de fluxos de detritos submarinos sem ocorrência de aquaplanagem. Esse comportamento atípico observado nas posições 2 e 3 pode ser explicado pela frente de onda fluidizada, formada pela incorporação da água ambiente em fluxos com alto teor de umidade, fazendo com que não haja uma distinção clara e um comportamento uniforme entre o fluxo e a corrente de turbidez.

A Figura 4.13 apresenta os perfis de velocidades para o ensaio w85\_p1.1 para três posições ao longo da caixa de ensaios: (a) início do fluxo, (b) posição intermediária e (c) final do fluxo. O ensaio w85\_p1.1 foi realizado com umidade baixa (85%) e pressão de lançamento (1,1 bar) alta, segundo a faixa de valores analisadas no presente trabalho, e assim como os dois ensaios anteriores não foram encontradas evidências de ocorrência de aquaplanagem nas análises das imagens e dos transdutores de poropressão e tensão total.

Assim como no ensaio w100\_p1.0, o ensaio w85\_p1.1 (Figura 4.13) também apresentou características de fluxos de detritos submarinos sem aquaplanagem em todas as posições. O fluxo propriamente dito apresentou velocidades baixas na base e perfil de velocidades parabólico. Na interface entre o fluxo e a corrente de turbidez também foram observados valores baixos para velocidade e acima disso não foi possível definir um comportamento padrão, justamente em função do comportamento turbulento apresentado pela corrente de turbidez. Sendo assim, o perfil de velocidades encontrado no ensaio w85\_p1.1 é mais uma evidência da não ocorrência da aquaplanagem no presente ensaio, juntamente com as análises obtidas através dos sensores e das imagens.

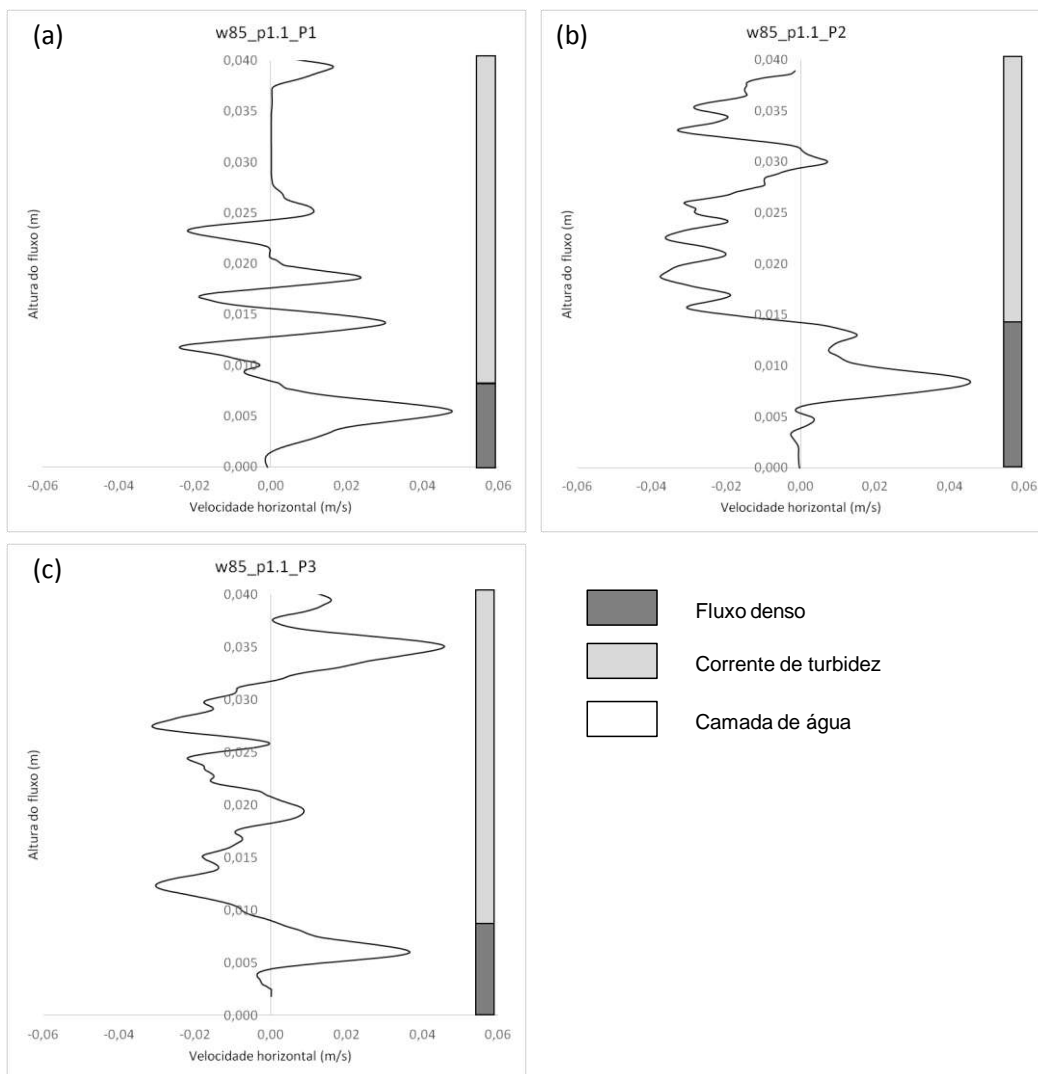


Figura 4.13 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w85\_p1.1 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

#### 4.3.3 Ensaios com possível ocorrência de aquaplanagem

A Figura 4.14 apresenta os perfis de velocidades para o ensaio w90\_p1.1 para três posições ao longo da caixa de ensaios: (a) início do fluxo, (b) posição intermediária e (c) final do fluxo. O ensaio w90\_p1.1 foi realizado com umidade intermediária (90%) e pressão de lançamento (1,1 bar) alta, segundo a faixa de valores analisadas no presente trabalho. As análises das imagens mostraram uma possível ocorrência de aquaplanagem, em que a cabeça de fluxo tende a levantar, mas não consegue se manter e as análises dos transdutores de poropressão e tensão

total não mostraram evidências de ocorrência de aquaplanagem em nenhuma das posições.

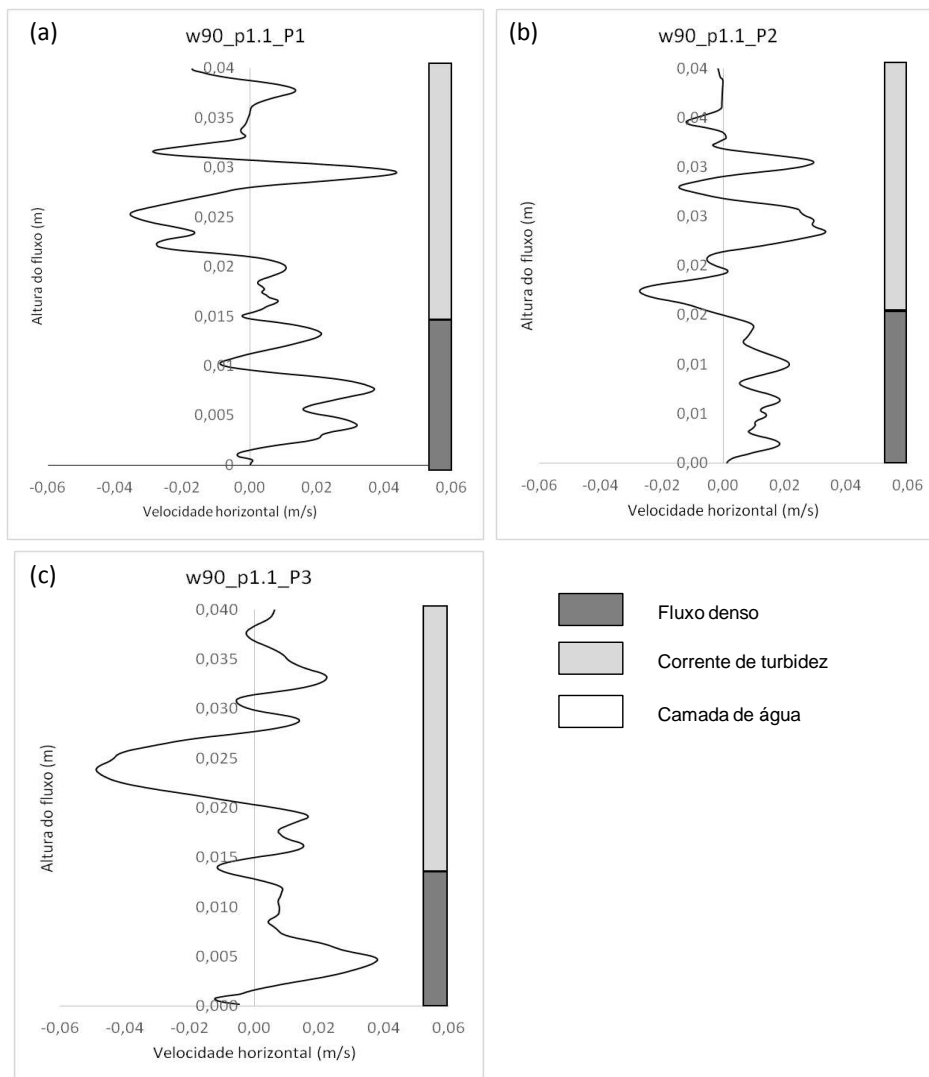


Figura 4.14 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w90\_p1.1 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

O ensaio w90\_p1.1 apresentou características de fluxos de detritos submarinos sem aquaplanagem nas posições 1 e 3, (Figura 4.14a e Figura 4.14c respectivamente). Nestas duas posições o fluxo apresentou velocidades baixas na base e na interface entre o fluxo e a corrente de turbidez. Diferentemente das posições 1 e 3, na posição 2, apesar das velocidades baixas nos dois pontos característicos, o fluxo em si não apresentou perfil de velocidades parabólico. Observou-se oscilações no perfil de velocidades do fluxo na posição 2 com vários pontos de máximo (Figura 4.14b). Esse comportamento pode ser atribuído justamente a alta pressão de

lançamento utilizada no ensaio que pode fazer com que o fluxo apresente comportamento turbulento e fora do padrão. Assim como observado nas análises obtidas dos sensores de tensões e nas imagens, pela análise do perfil de velocidades também não é possível afirmar que ocorreu ou não aquaplanagem no ensaio w90\_p1.1.

#### 4.3.4 Ensaio com ocorrência de aquaplanagem

A Figura 4.15 apresenta os perfis de velocidades para o ensaio w90\_p0.9 para três posições ao longo da caixa de ensaios: (a) início do fluxo, (b) posição intermediária e (c) final do fluxo. O ensaio w90\_p0.9 foi realizado com umidade (90%) e pressão de lançamento (0,9 bar) intermediárias, segundo a faixa de valores analisadas no presente trabalho. Tanto as análises das imagens quanto as dos transdutores de poropressão e tensão total mostraram evidências de ocorrência de aquaplanagem.

No ensaio w90\_p0.9 (Figura 4.15), as posições 2 (Figura 4.15b) e 3 (Figura 4.15c) apresentaram comportamento semelhante ao ensaio w85\_p1.1: perfil ligeiramente parabólico no corpo do fluxo e mudança brusca no perfil de velocidades na transição do fluxo para a corrente de turbidez. Em contraste com as demais posições, e de acordo com o esperado segundo as análises nos dois itens anteriores, o perfil de velocidades na Posição 1 (Figura 4.15a) apresentou forma de uma semi parábola com simetria no eixo x e no sentido contrário ao movimento do fluxo. Nesta posição o perfil de velocidades se caracteriza por valores baixos próximos a base, que vão aumentando ao longo do fluxo até atingir um valor máximo, que coincide com a fronteira entre o corpo do fluxo e a corrente de turbidez, caracterizando então a aquaplanagem. A partir deste valor máximo, o único aspecto que pode se afirmar é que o perfil de velocidades passa a apresentar predominantemente valores positivos sem comportamento padrão. A análise do perfil de velocidades do ensaio w90\_p0.9 serviu para, juntamente com os resultados das medidas de poropressão e tensão total e das imagens, definir mais um parâmetro característico de fluxos de detritos submarino com aquaplanagem.

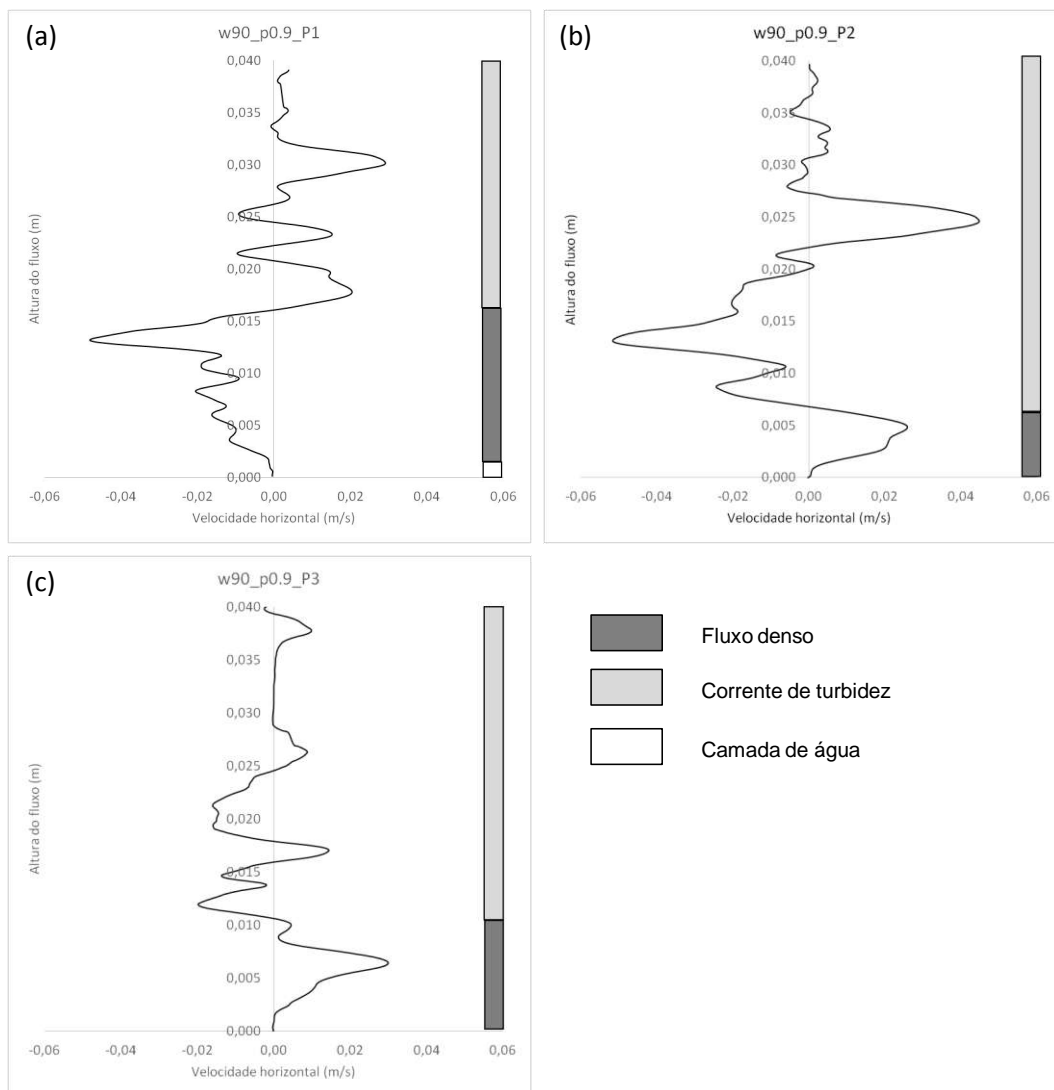


Figura 4.15 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w90\_p0.9 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

A Figura 4.16 apresenta os perfis de velocidades para o ensaio w90\_p0.8 para três posições ao longo da caixa de ensaios: (a) início do fluxo, (b) posição intermediária e (c) final do fluxo. O ensaio w90\_p0.8 foi realizado com umidade intermediária (90%) e pressão de lançamento baixa (0,8 bar), segundo a faixa de valores analisadas no presente trabalho. Tanto as análises das imagens quanto as dos transdutores de propressão e tensão total mostraram evidências de ocorrência de aquaplanagem.

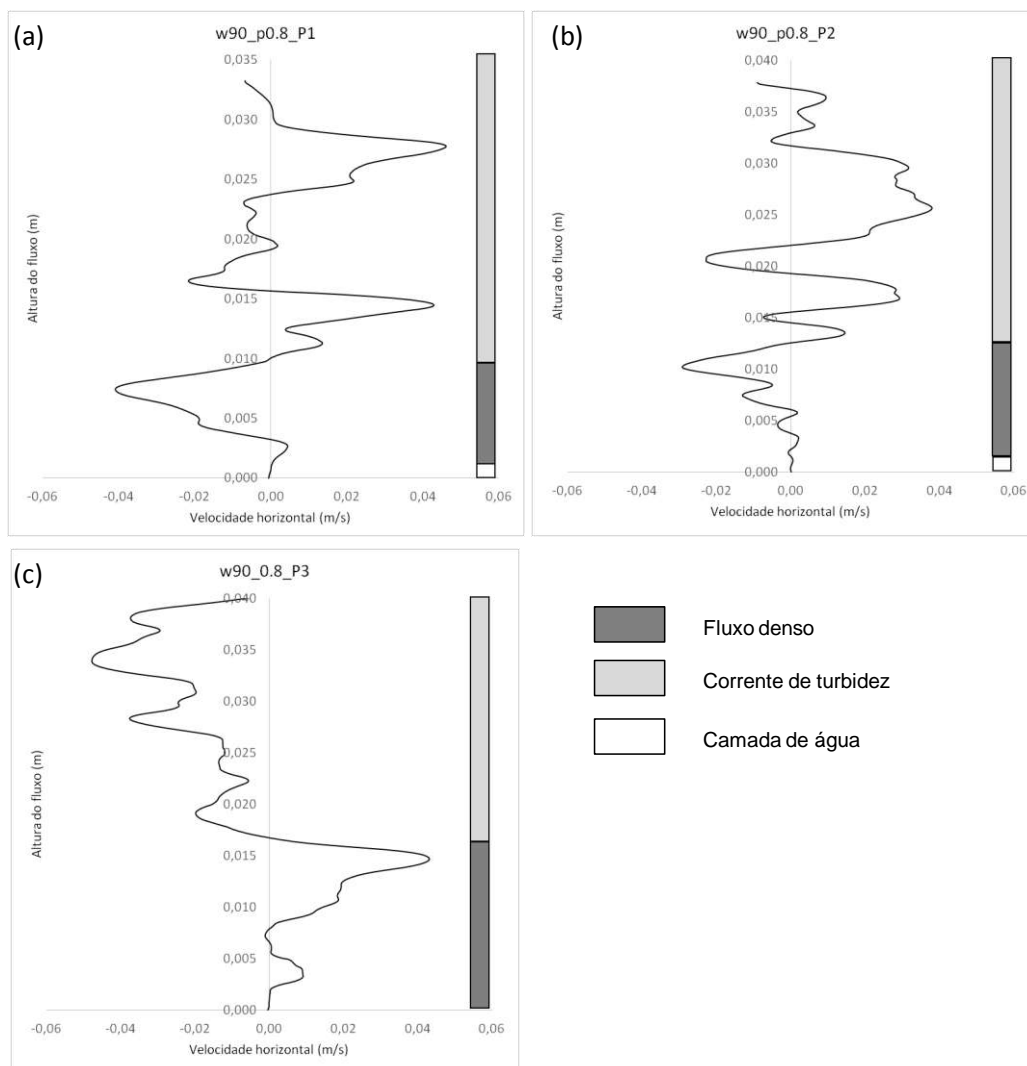


Figura 4.16 - Perfil de velocidades horizontais da região frontal para o ensaio w90\_p0.8 para (a) Posição 1 (b) Posição 2 (c) Posição 3

O ensaio w90\_p0.8 (Figura 4.16) apresentou, nas Posições 1 (Figura 4.16a) e 2 (Figura 4.16b), um perfil de velocidades que se caracteriza por valores baixos próximos a base, que vão aumentando em forma de uma semi parábola ao longo da altura do fluxo até atingir um valor máximo, o qual coincide justamente com a fronteira entre o corpo do fluxo e a corrente de turbidez. Diferente do ensaio w90\_p0.9 (Figura 4.15), que também apresentou aquaplanagem, no ensaio w90\_p0.8 são observadas velocidades menores no corpo do fluxo de detritos, isso porque o ensaio w90\_p0.8 foi realizado com uma menor energia de lançamento. Na posição 3 (Figura 4.16c), conforme mostrado nas imagens, a cabeça de fluxo já não existia mais e observou-se apenas a presença de corrente de turbidez e por isso o fluxo não apresentou um comportamento bem definido nesta posição.



#### 4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção será apresentada uma visão geral e comparativa dos resultados dos seis ensaios apresentados anteriormente. A

Tabela 4.2 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados assim como uma comparação do comportamento do *debris flow* segundo duas variáveis de análise:

- **Variável 1** - Na análise das imagens é possível observar a formação da cabeça de fluxo e/ou levantamento da mesma;

- **Variável 2** - As medidas de poropressão e tensão total apresentam evidência de aquaplanagem;

Tabela 4.2 - Resumo dos resultados obtidos

Características do ensaio			Variáveis analisadas	
Ensaio	Umidade da mistura	Pressão externa (bar)	1 - Imagens	2 - Poropressão e Tensão Total
w100_p1.0	100%	1,0	-	-
w100_p0.8	100%	0,8	-	-
w90_p1.1	90%	1,1	OK	-
w90_p0.9	90%	0,9	OK	OK
w90_p0.8	90%	0,8	OK	OK
w85_p1.1	85%	1,1	-	-

Os resultados obtidos nos ensaios evidenciaram ocorrência de aquaplanagem nos ensaios w90\_p0.9 e w90\_p0.8, na análise de ambas variáveis. Nas imagens de vídeo do ensaio w90\_p1.1 também foi possível observar levantamento da região frontal e uma distinção marcante de tamanho da cabeça em relação ao corpo do fluxo. Apesar disso, o comportamento da poropressão e tensão total do ensaio w90\_p1.1 não apresentaram evidências da formação de aquaplanagem.

Em contraste com os demais, os resultados das medições de poropressão e tensão total dos ensaios w85\_p1.1, w100\_p0.8 e w100\_p1.0 refletem que a aquaplanagem efetivamente não ocorreu e as imagens dos mesmos confirmam tal fato.

Os ensaios w90\_p1.1, w90\_p0.9 e w90\_p0.8 foram realizados sob mesmo teor de umidade (90%), mas foram lançados com diferentes pressões. Pode se observar que o aumento de pressão de 0,8 bar para 0,9 bar do ensaio w90\_p0.8 para o ensaio w90\_p0.9 não foi suficiente para modificar as condições de ocorrência da

aquaplanagem. No entanto, o incremento de pressão utilizado no ensaio w90\_p1.1 foi determinante para a não ocorrência de aquaplanagem.

A viscosidade apresentada pelas misturas com teor de umidade de 90% favorece a ocorrência da aquaplanagem. No entanto o fenômeno só ocorre para pressões igual ou abaixo de 0.9 bar. No caso de altas pressões de lançamento (1,1 bar), existe uma tendência de não ocorrer aquaplanagem para qualquer valor de viscosidade, pois a alta energia de lançamento faz com que o fluxo tenha sempre a predominância da corrente de turbidez. Dessa forma pode se concluir que fluxos que envolvem grandes quantidades de energia podem apresentar formação da cabeça e/ou descolamento da mesma do fundo. No entanto as altas velocidades envolvidas não permitem que uma fina camada de lama de baixa viscosidade se introduza na base do fluxo e proporcione maiores distâncias percorridas.

A influência da umidade foi também avaliada para fluxos com  $w = 100\%$ , de forma a verificar se as conclusões da análise anterior são válidas para fluxos com alto teor de umidade. Para tanto foram analisados os ensaios w100\_p1.0 (alta pressão de lançamento) e w100\_p0.8 (baixa pressão de lançamento), onde em ambos os ensaios foi observada a predominância de correntes de turbidez e a não ocorrência da aquaplanagem. Dessa forma, para fluxos com teor de umidade alto, o fator predominante para a não ocorrência da aquaplanagem é a baixa tensão de escoamento dos mesmos. Ou seja, a alteração da energia de lançamento, apesar de melhorar as condições para a formação da cabeça de fluxo, promove uma frente de onda fluidizada com comportamento turbulento que permite que a água do ambiente se incorpore ao fluxo fazendo com que não haja distinção clara entre o fluxo e a corrente de turbidez.

Já na análise comparativa de ensaios realizados sob mesma pressão observou se que enquanto que no ensaio w85\_p1.1 a lama nem atingiu a posição 2 da caixa, no ensaio w90\_p1.1 o fluxo se desenvolveu completamente, mas não a ponto de ocorrer aquaplanagem. Dessa forma pode se concluir que pequenas variações no teor de umidade, no caso de 5%, são suficientes na determinação da mobilidade do fluxo, mas não determinantes para a ocorrência da aquaplanagem.

A validade das informações a respeito de ensaios realizados sob mesma pressão foi também verificada para fluxos lançados sob baixas pressões (0,8 bar) através da comparação entre os ensaios w100\_0.8 e w90\_0.8. Enquanto que o ensaio w90\_p0.8 apresenta todas as evidências de ocorrência de aquaplanagem, uma alteração na umidade de 90% para 100%, do ensaio w90\_p0.8 para o w100\_p0.8,

modificou completamente a aparência do fluxo a ponto de que para o caso de fluxos lançados com 0,8 bar e  $w = 100\%$  não é possível distinguir o fluxo propriamente dito da corrente de turbidez. Dessa forma conclui-se que apesar da pressão de lançamento alterar a mobilidade do fluxo, apenas para baixas pressões é um fator determinante para a ocorrência ou não de aquaplanagem.

Em relação a tensão de escoamento ideal para ocorrência de aquaplanagem pode se inferir que fica em torno de 200 Pa, enquanto que os valores de viscosidade variam entre  $4 \text{ s}^{-1}$  e  $4,2 \text{ s}^{-1}$ . Vale lembrar que embora nos ensaios deste estudo tenham sido utilizadas misturas de caulim e carvão, e não caulim e areia como de costume, os parâmetros tensão de escoamento e viscosidade da mistura sempre foram controlados visando caracterizar fluxos de argila com pequenas proporções de areia.

Em concordância com as análises dos transdutores e das imagens, todos os ensaios em que não foi observada aquaplanagem apresentaram perfil de velocidades característico de fluxos de detritos submarinos. No entanto, os fluxos com ocorrência de aquaplanagem apresentaram perfis diferenciados justamente nas posições em que ocorreram levantamento da cabeça e introdução de água na base do fluxo.

Os fluxos com ocorrência de aquaplanagem apresentaram velocidades partindo de valores baixos até atingir um valor máximo, que coincide justamente com o ponto de transição do corpo do fluxo para a corrente de turbidez, formando uma semi parábola (Figura 4.17). Além disso os vetores de velocidades do corpo do fluxo se apresentam no sentido contrário do fluxo, conforme mostrado na Figura 4.17. Em concordância com a literatura os fluxos sem ocorrência de aquaplanagem apresentaram o seguinte comportamento: valores baixos no meio do perfil, coincidindo com a fronteira entre o *debris flow* e a corrente de turbidez e a velocidade é máxima no meio do debris flow (formando um perfil parabólico) e na transição para a corrente de turbidez. Em ambos os casos não é possível definir o comportamento da corrente de turbidez, justamente por apresentar um fluxo turbulento e com presença de vórtices.

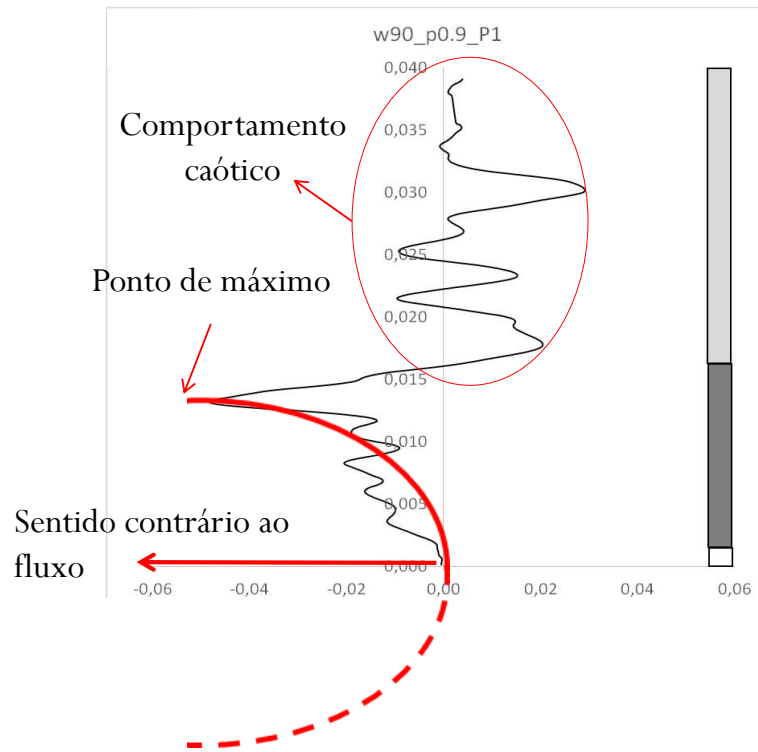


Figura 4.17 - Perfil teórico para fluxos de detritos submarinos com ocorrência de aquaplanagem

# 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

## 5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal simular, através da modelagem física em centrífuga, um fluxo de detritos submarino com inclinação suave para o estudo do efeito da aquaplanagem. O foco principal da pesquisa se deu através da análise do campo vetorial de velocidades e a medição de tensões totais e poropressão durante a ocorrência do fenômeno.

### 5.1.1 Modelagem física em centrífuga e aparato experimental

Inicialmente, conclui-se sobre a importância da modelagem física em centrífuga no ramo da simulação de grandes deslizamentos submarinos reproduzindo as tensões do evento em escala real. Dessa forma, dentro da modelagem física, cresce de importância a utilização da centrífuga geotécnica pelo seu elevado desempenho e praticidade. Em particular a utilização da centrífuga geotécnica de tambor se mostrou uma ferramenta bastante propícia para a presente simulação. A centrífuga geotécnica da COPPE, pela primeira vez, depois das inúmeras adaptações citadas anteriormente, desempenhou sua real função: a utilização quase que completa do seu anel e conseqüentemente a possibilidade de simulação de fluxos de detritos submarinos de grande extensão.

No que diz respeito à montagem do aparato experimental, por ser um ensaio pioneiro na COPPE, pode se concluir que um o principal desafio enfrentado foi a concepção dos ensaios, a escolha de materiais e equipamentos ideais para utilização a  $N$  vezes a gravidade da Terra e o controle de vazamentos na centrífuga. Superaram-se dificuldades associadas a diferentes questões para se obter os resultados esperados. Entre estas citam-se: a escolha da instrumentação adequada e inserção da mesma na base do modelo, a escolha da rugosidade adequada da base, o controle de vazamentos na centrífuga e a forma de lançamento da lama. No caso do sistema de monitoramento dos ensaios, a utilização de câmeras que atendessem aos quesitos qualidade e velocidade de vídeo, resistência a impactos e pequenas dimensões também foi alvo de estudos diversos.

Observou-se também o grande potencial da Velocimetria por Imagem de Partículas na medição do campo de velocidades. Este foi o primeiro estudo em que o PIV foi utilizado na centrífuga de tambor da COPPE. A técnica foi extremamente adequada por ser não intrusiva, criando melhores condições de contorno e reprodução do fenômeno.

### 5.1.2 O fenômeno da aquaplanagem

O fenômeno da aquaplanagem é caracterizado pela presença de uma fina camada de lama de baixa viscosidade que significativamente incrementa a mobilidade dos sedimentos, reduzindo a tensão efetiva e conseqüentemente a resistência ao cisalhamento do fluxo de detritos. No presente trabalho as evidências de ocorrência deste fenômeno foram verificadas por meio da análise visual da deformação da região frontal da massa deslizante e da intrusão de uma fina camada de água na parte frontal de fluxo de detritos e dos resultados de medidas de tensão total e de poropressão. A partir destes resultados foram definidos os perfis de velocidades para fluxos com ocorrência de aquaplanagem, bem como a influência do teor de umidade e da energia de lançamento da mistura.

Os resultados obtidos mostraram que para que ocorra aquaplanagem, o teor de umidade deve ser tal que a mistura não seja fluída, e se transforme apenas em corrente de turbidez, e paralelamente que a mistura apresente viscosidade e tensão de escoamento suficientes para que ocorra formação da cabeça e levantamento da mesma. Concluiu-se que, para as condições de fluxo do presente estudo, o teor de umidade ideal para tais condições é de 90%. No entanto embora o fluxo apresente teor de umidade adequado para ocorrência de aquaplanagem verificou-se que a energia envolvida no deslizamento do talude também exerce influência. Dessa forma pressões abaixo de 0,9 bar em misturas com teor de 90% constituem proporções ideais para a ocorrência de aquaplanagem para as condições de fluxo ensaiadas. Para pressões de lançamento altas (1,1 bar) existe uma tendência de não ocorrer aquaplanagem para qualquer valor de viscosidade, pois a alta energia de lançamento faz com que o fluxo tenha sempre a predominância da corrente de turbidez.

Em relação a deformação da cabeça de fluxo, a literatura apresenta que em casos de ocorrência de aquaplanagem, a espessura da cabeça frontal é cerca de 2 a 3 vezes maior que a espessura média do escorregamento. No presente trabalho, essa

diferença de tamanho foi observada, porém em cerca de 1,7 a 1,8 vezes nos ensaios que apresentaram aquaplanagem.

É importante enfatizar que embora existam poucos estudos dedicados a modelagem física de deslizamentos submarinos, estes em sua maioria são realizados em ambientes 1g. Portanto, este trabalho contribui de forma a melhor compreender a influência da velocidade nesse fenômeno, uma vez que ainda não existem estudos envolvendo a definição do perfil de velocidades para fluxos de detritos submarinos com ocorrência de aquaplanagem. Os resultados das imagens, qualitativamente e quantitativamente (PIV) associados às medidas em transdutores confirmaram que o fenômeno da aquaplanagem também pode ser evidenciado através do perfil de velocidades, uma vez que fluxos com ocorrência de aquaplanagem apresentam comportamento diferenciado dos demais.

De maneira geral os perfis de velocidade para fluxos de detritos submarinos obtidos foram consistentes com a literatura, o que sugere a confiabilidade dos ensaios.

## 5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Neste trabalho foi possível simular fluxos de detritos submarino em taludes de suave inclinação, determinando a formação da aquaplanagem. Foi definido também as principais diferenças nos perfis de velocidade para fluxos com e sem ocorrência de aquaplanagem.

Como existem poucos estudos dedicados à compreensão de fluxos de detritos submarinos, e o fato de os existentes terem sido realizados em ambiente 1g, é importante executar simulações em modelagem física para assim estabelecer se os estudos realizados podem ser aplicados também a cálculos de escorregamentos reais.

Para futuras pesquisas, pode-se modelar o fluxos de detritos submarinos, utilizando o aparato experimental já existente, mas utilizando solo proveniente do leito marinho brasileiro. Outra contribuição importante seria avaliar a influência da rugosidade do leito marinho de modo a simular tanto solos argilosos como arenosos.

Podem ser realizados também ensaios visando avaliar o campo de velocidades ao longo do corpo do fluxo e comparar com os valores obtidos para a região frontal, uma vez que a cabeça de fluxo possui tendência de acelerar quando apresenta aquaplanagem. É pertinente também avaliar a influência da energia envolvida no fluxo através análise da velocidade do fluxo na entrada do canal.

Além disso sugere-se a realização de estudos de *debris flow* subaéreos através da implementação de algumas modificações no aparato experimental e nos procedimentos.

Uma contribuição bastante significativa na área de fluxos de detritos submarinos seria a modelagem numérica destes eventos prevendo a ocorrência de aquaplanagem. Para tanto utilizar métodos numéricos sem malha, como é o caso do MPM (Método dos Pontos Materiais) e SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).



# REFERÊNCIAS

ADRIAN, R., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics". **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 23, pp. 261–304.

ALMEIDA, M. S. S., ALMEIDA, M. C. F., OLIVEIRA, J.R.M.S., 2016. Twenty years of Centrifuge Modeling at the Federal University of Rio de Janeiro. In: **3 European Conference on Physical Modelling in Geotechnics - Eurofuge 2016**, Nantes.

ANDRESEN, A. AND BJERRUM, L., 1967, "Slides in subaqueous slopes in loose sand and silt". **Marine Geotechnique**, pp. 221- 239.

BARKER, H.R., 1998, **Physical Modelling of Construction Processes in the MiniDrum Centrifuge**. PhD Thesis, University of Cambridge, United Kingdom.

BARLEY, B., 1999, "Deepwater problems around the world". **The Leading Edge**, v. 18, pp. 488–494.

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". In: Lykousis V, Sakellariou D, Locat J (eds) **Submarine mass movements and their consequences**. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol 27, pp. 101-110.

BRYN, P., SOLHEIM A., BERG K., LIEN R., FORSBERG C. F., HAFLIDASON H., OTTOSEN D., RISE L., 2002, "The Storegga Slide Complex: Repeated large scale sliding in response to climatic ciclicity", **Submarine Mass Movements and their consequences: Advances in Natural and Technological Hazard Research**, vol 19, pp. 215–222.

BRYN, P., BERG, K., FORSBERG, C.F., SOLHEIM, A., KVALSTAD, T.J., 2005. "Explaining the Storegga Slide". **Marine and Petroluem Geology**, vol .22, pp. 11-19.

CALLE, J. A. C., 2007. **Comportamento geomecânico de resíduos sólidos urbanos**, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CALVO, L., HADDAD, B., PASTOR, M., PALACIOS, D., 2014. Runout and deposit morphology of Bingham fluid as function of initial volume: implication for debris flow modelling. **Natural Hazards**.

CARTER, L., MILLIMAN J., TALLING P.J., GAVEY R., WYNN R.B., 2012. "Near-synchronous and delayed initiation of long run-out submarine sediment flows from a record-breaking river flood". **Geophysical Research Letters**, vol. 39.

CORNFORTH, D.H., LOWELL, J.A., 1996. "The 1994 submarine slope failure at Skagway, Alaska". **Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides**, Trondheim, vol. 1, pp. 527-532.

COULTER, S.E., 2005. **Seismic initiation of submarine slope failures using physical modeling in a geotechnical centrifuge**. Master Thesis, Memorial University of Newfoundland.

DE BLASIO, F.V., ELVERHOI, A., ISSLER, D., HARBITZ, C.B., BRYN, P., LIEN, R., 2004. "Flow model of natural debris flow originating from overconsolidated clay materials". **Marine Geology**, vol. 213, pp. 439-455.

ELVERHØI, A., ISSLER, D., DE BLASIO, F.V., ILSTAD, T., HARBITZ, C. B., GAUER, P., 2005. "Emerging insights into the dynamics of submarine debris flows". **Natural Hazards and Earth System Sciences**, vol. 5, pp. 633–648.

FAGUNDES, D. F., 2010. **Modelagem física de estruturas offshore assentes em leito marinho**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

FELIX, M., PEAKALL, J., 2006. "Transformation of debris flows into turbidity currents: mechanisms inferred from laboratory experiments". **Sedimentology**, vol. 53, pp. 107-123.

FERNANDES, F. C., BORGES, R. G., TARAZONA, S. F. M., BRETSCHEIDER, A., ALMEIDA, M. C. F., ALMEIDA, M. S. S., 2017. Análise Sísmica de Taludes Submarinos Através de Modelagem Centrífuga. Em: **XII Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, Florianópolis.

FERNANDES, F. C., 2018. **Propriedades Geotécnicas Dinâmicas e Estáticas do Speswhite Kaolin**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. Em andamento.

GUE, S.S., 2012. **Submarine Landslide Flows Simulation Through Centrifuge Modelling**, University of Cambridge, United Kingdom.

HAFIDASON, H., LIEN, R., SEJRUP, H.P., FORSBERG, C.G. , BRYN, P., 2005. "The dating and morphometry of the Storegga Slide". **Marine and Petroleum Geology**, vol. 22, pp. 123–136.

HAMPTON, M.A., LEE, H.J. , LOCAT, J., 1996. Submarine Landslides. **Reviews of Geophysics**, v.34, pp. 33-59.

HAMPTON, M. A., 1970. **Subaqueous debris flow and generation of turbidity currents**. PhD thesis, Stanford University, USA.

HAMPTON, M. A., 1972. "The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents", **Journal of Sedimentary Research**, vol. 42, pp. 775–793.

HANCE, J.J., 2003. **Development of a Database and Assessment of Seafloor Slope Stability based on Published Literature**, MSc Thesis, University of Texas, Austin.

HARBITZ, C. B., PARKER, G., ELVERHØI, A., MARR, J.G., MOHRIG, D., HARFF, P. A., "Hydroplaning of subaqueous debris flows and glide blocks: Analytical solutions and discussion"., **Journal of Geophys Research**, vol. 108, 2003.

HENKEL, D.J., 1970. "The role of waves in causing submarine landslides". **Geotechnique**, vol. 20, pp. 75-80.

KENNETT, J., CANNARIATO, K.G., HENDY, I.L., BEHL, R.J., 2003. **Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: The Clathrate Gun Hypothesis**. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 216.

HOTTA, M. M., 2018. **Modelagem centrífuga e numérica de um *debris flow* submarino**, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. Em andamento.

HUANG, X., GARCIA, M.H., 1999. "Modelling of non-hydroplaning mudflows on continental slopes". **Marine Geology**, vol. 154, pp. 131-142.

ILSTAD, T., DE BLASIO, F.V., ELVERHØI, A., HARBITZ, C.B., ENGVIK, L., LONGVA, O., MARR, J.G., 2004c. "On the frontal dynamics and morphology of submarine debris flows". **Marine Geology**, vol. 213, pp. 481-497.

ILSTAD, T., 2005. **On the Dynamics and Morphology of Submarine Debris Flows**. PhD thesis, University of Oslo.

IVERSON, R.M., 1997. "The physics of debris flow". **Reviews of Geophysics**, vol. 35, pp. 245-296.

KVALSTAD, T.J., ANDRESEN, L., FORSBERG, C.F., BRYN, P., WANGEN, M., 2005. "The Storegga slide: evaluation of triggering sources and slide mechanics". **Marine and Petroleum Geology**, vol. 22, pp. 245-256.

LOCAT, J.; LEE, J., 2000. "Submarine landslides: Advances and Challenges". In: **Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides**, Cardiff, UK, pp. 193-212.

LOCAT, J., LEE, J., 2002. "Submarine landslides : advances and challenges". **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 39, pp. 193–212.

LOCAT, J., LEE, J., 2005. "Subaqueous Debris Flows". In: **Mathias et Hungr (eds.), Debris-flows Hazards and Related Phenomena**, Springer, pp. 203–245

MADABHUSHI, G., 2014. "Centrifuge Modelling for Civil Engineers". In: **CRC Press**, London, New York.

MARR, J.G., HARFF, P.A., SHANMUGAM, G. AND PARKER, G., 2001. "Experiments on subaqueous sandy gravity flows: The role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures". **Geological Society of America Bulletin**, vol. 113, pp. 1377–1386.

MOHRIG, D., ELVERHOI, A., PARKER, G., 1999. "Experiments on the relative mobility of muddy subaqueous and subaerial debris flows and their capacity to remobilize antecedent deposits". **Marine Geology**, vol. 154, p.117-129.

MOHRIG, D., MARR, J.G., 2003. "Constraining the efficiency of turbidity current generation from submarine debris flows and slides using laboratory experiments". **Marine and Petroleum Geology**, vol. 20, pp. 883-899.

MOHRIG, D., WHIPPLE, K.X., HONDZO, M., ELLIS, C., PARKER, G., 1998. "Hydroplaning of subaqueous debris flow". **Geological society of America Bulletin**, v.110, n.3, p.387-394.

MORALES, A.E.R., 2014. **Evaluación del PIV como método de medida en geotecnia**. Trabajo Final de Máster, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain.

MOTTA, H. P. G., 2008. **Comportamento de um rejeito de transição em centrífuga geotécnica**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MULDER, T.; COCHONAT, P. (1996). **Classification of offshore mass movements**. **Journal of Sedimentary Research**, v.66, p.43-57.

MURLF, J.D, 1996. "The geotechnical centrifuge in offshore engineering". **Offshore Technology Conference**. Houston, Texas.

PACHECO, L. A., 2006. **Modelagem física e numérica de um duto enterrado em areia sujeito a deslocamento lateral**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PARDO, E. A. A., 2015. **Simulação de instabilidade de taludes submarinos usando modelagem centrífuga**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PAULL, C.K., USSLER, W., AND DILLON, W.P., 2000. "Potential role of gas hydrate decomposition in generating slope failures. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments", **Kluwer Academic Publishers**, Dordrecht, Netherlands, pp. 149-156.

PEQUENO, J. G. A., 2013. **Comportamento de dutos enterrados sujeitos a movimentos de massa em solos**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PHILLIPS, R. AND BYRNE, P.M., 1994. "Modelling slope liquefaction due to static loading". **47th Canadian Geotechnical Conference**, Halifax, Canada, pp. 317-326.

PIPER, D.J.W., COCHONAT, P., MORRISON, M., 1999. "The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: Initiation of debris flows and turbidity currents inferred from sidescan sonar". **Sedimentology**, vol 46, pp. 79–97.

PRIOR, D.B., 1984. "Subaqueous landslides". In: **Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides**, Toronto, pp. 179-196.

SCHOFIELD, A.N., 1980. "Cambridge geotechnical centrifuge operations". **Geotechnique**, v. 25, n.4, pp. 743-61.

SCHWARZ, H.U., 1982. "Subaqueous Slope Failures- Experiments and Modern Occurrences". **Contributions to sedimentology**, Stuttgart.

STEWART, D.P., 1992. **Lateral Loading of Piled Bridge Abutments due to Embankment Construction**, Ph.D. Thesis, University of Western Australia, Australia.

TALLING, P.J., 2014. "On the triggers, resulting flow types and frequencies of subaqueous sediment density flows in different settings". **Marine Geology**, vol. 352, pp. 155-182.

TAPPIN, D.R., WATTS, P., GRILLI, S.T., 2008. "The Papua New Guinea tsunami of 17 July 1998: Anatomy of a catastrophic event". **Natural Hazards and Earth System Science**, vol. 8, pp. 243–266.

TAYLOR, R.N., 1995. **Geotechnical Centrifuge Technology**. In: Blackie Academic and Professional, London, UK.

TAYLOR, Z. J., GURKA, R., KOPP, G. A., & LIBERZON, A., 2010. "Long-Duration TimeResolved PIV to Study Unsteady Aerodynamics". **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 59(12), pp. 3262–3269.

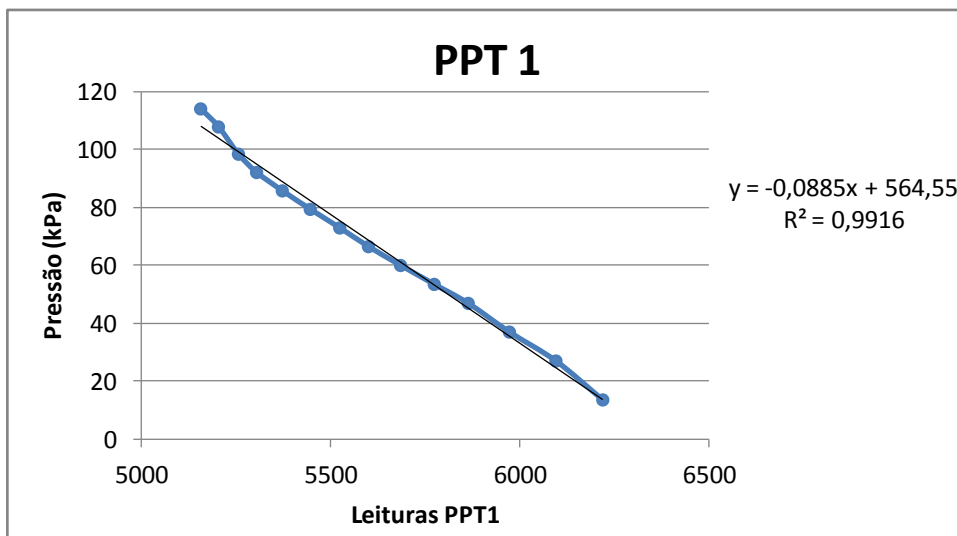
THIELICKE, W., & STAMHUIS, E. J., 2014. "PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB". **Journal of Open Research Software**, vol. 2, pp. 2–10.

WHITE, D., TAKE, W. A., & BOLTON, M. D., 2003. "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry". **Geotechnique**, vol. 53(7), pp. 619–631.

ZHOU, S.H., LIU, J.G., WANG, B.L., YANG, L.C. AND GONG, Q.M., 2002. "Centrifugal model test on the stability of underwater slope". **Physical modelling in Geotechnics: ICPMG' 02**, pp. 759-764, Canada.

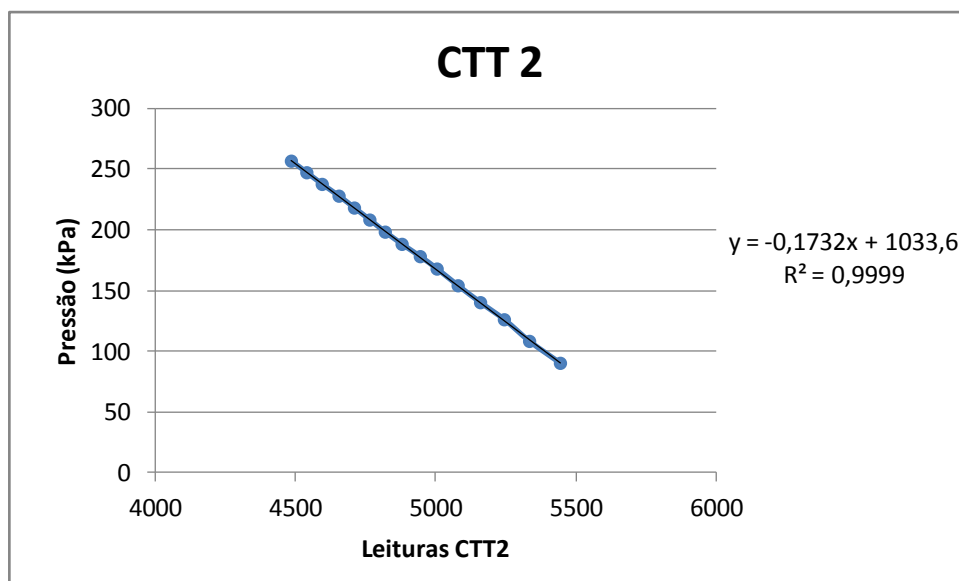
**ANEXO 01 - CALIBRAÇÃO EM VÔO DOS TRANSDUTORES DE POROPRESSÃO E TENSÃO TOTAL**

Leitura PPT 1	leitura régua modelo (cm)	Pressão (kPa)
6220	0,4	13,58
6096	0,8	27,02
5973	1,1	37,01
5864	1,4	46,92
5774	1,6	53,48
5685	1,8	60,01
5600	2	66,50
5524	2,2	72,96
5446	2,4	79,38
5372	2,6	85,76
5304	2,8	92,11
5256	3	98,43
5203	3,3	107,84
5156	3,5	114,06

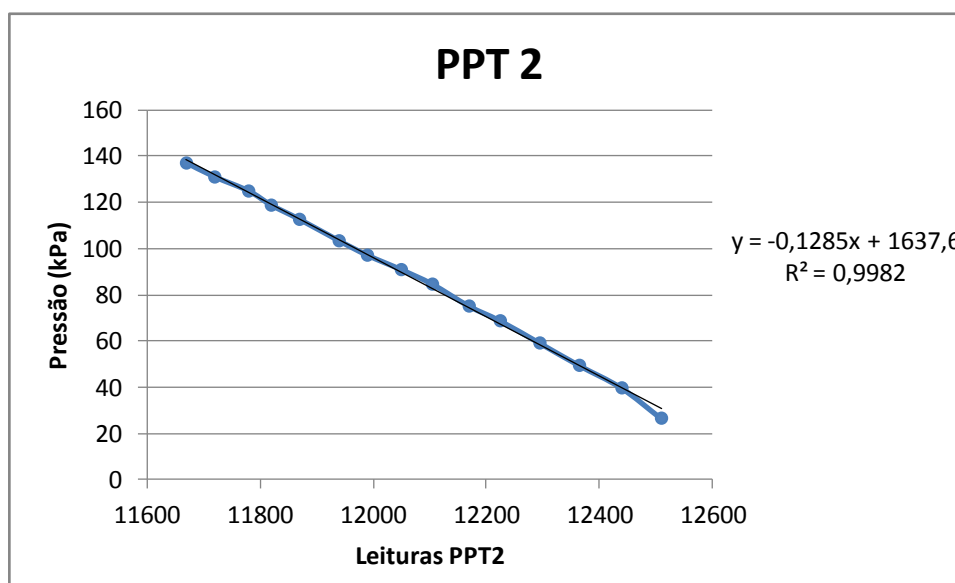




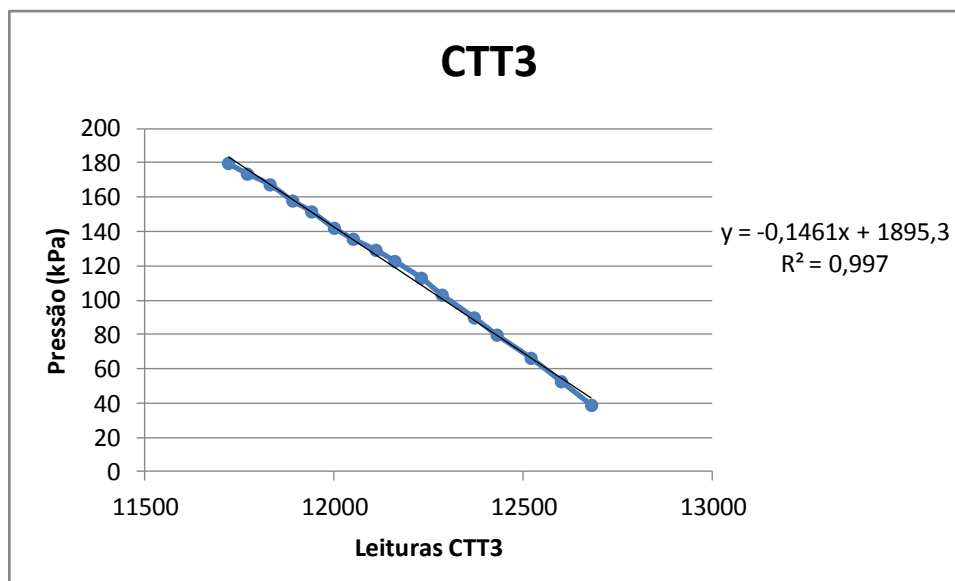
Leitura CTT 2	leitura régua modelo (cm)	Pressão (kPa)
5445	2,4	89,99
5335	2,9	108,04
5245	3,4	125,84
5160	3,8	139,91
5080	4,2	153,82
5005	4,6	167,58
4945	4,9	177,80
4880	5,2	187,93
4820	5,5	197,97
4765	5,8	207,93
4710	6,1	217,80
4655	6,4	227,58
4595	6,7	237,27
4540	7	246,88
4485	7,3	256,40



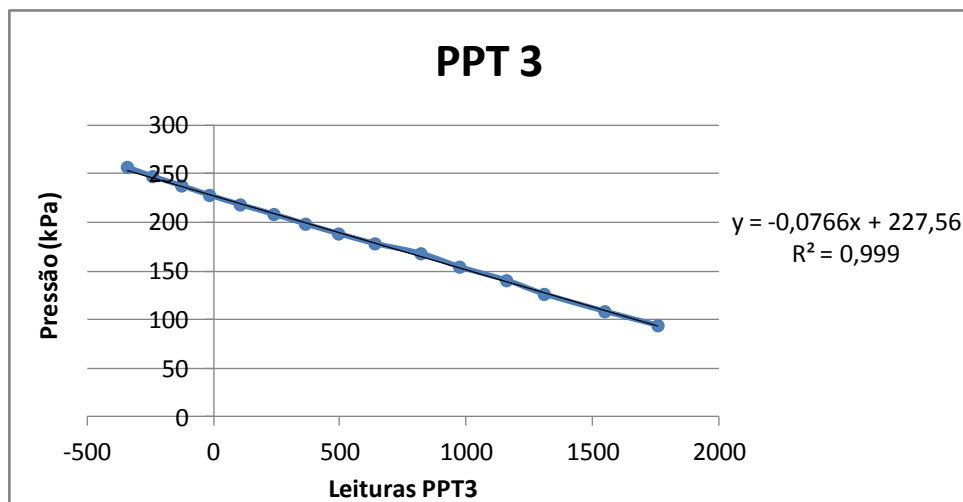
Leitura PPT 2	leitura régua modelo (cm)	Pressão (kPa)
12510	0,8	26,61
12440	1,2	39,72
12365	1,5	49,47
12295	1,8	59,15
12225	2,1	68,76
12170	2,3	75,12
12105	2,6	84,61
12050	2,8	90,89
11990	3	97,15
11940	3,2	103,37
11870	3,5	112,64
11820	3,7	118,78
11780	3,9	124,89
11720	4,1	130,97
11670	4,3	137,02



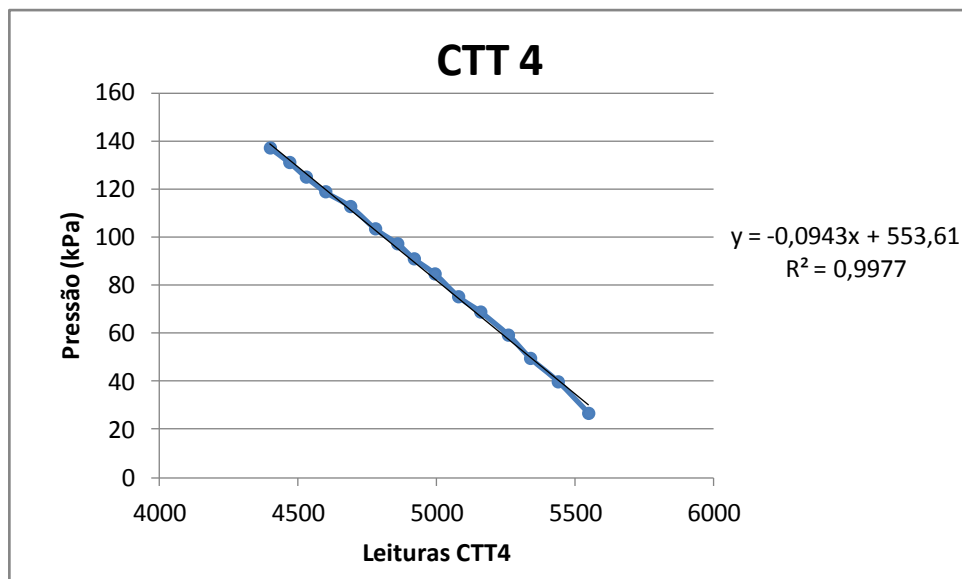
Leitura CTT 3	leitura régua modelo (cm)	Pressão (kPa)
12680	1,1	38,61
12600	1,5	52,39
12520	1,9	66,03
12430	2,3	79,54
12370	2,6	89,59
12285	3	102,86
12230	3,3	112,72
12160	3,6	122,51
12110	3,8	128,99
12050	4	135,44
12000	4,2	141,85
11940	4,5	151,41
11890	4,7	157,73
11830	5	167,16
11770	5,2	173,41
11720	5,4	179,61



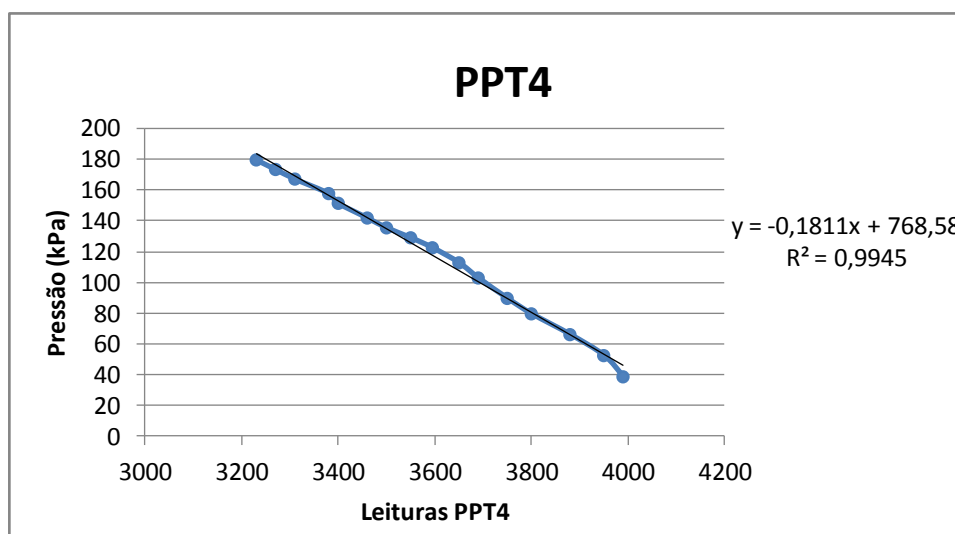
Leitura PPT 3	leitura régua modelo (cm)	Pressão (kPa)
1760	2,5	93,62
1550	2,9	108,04
1310	3,4	125,84
1161	3,8	139,91
975	4,2	153,82
822	4,6	167,58
640	4,9	177,80
496	5,2	187,93
365	5,5	197,97
240	5,8	207,93
107	6,1	217,80
-15	6,4	227,58
-125	6,7	237,27
-240	7	246,88
-340	7,3	256,40



Leitura CTT 4	leitura régua modelo (cm)	Pressão (kPa)
5550	0,8	26,61
5440	1,2	39,72
5340	1,5	49,47
5260	1,8	59,15
5160	2,1	68,76
5080	2,3	75,12
4995	2,6	84,61
4920	2,8	90,89
4860	3	97,15
4780	3,2	103,37
4690	3,5	112,64
4600	3,7	118,78
4530	3,9	124,89
4470	4,1	130,97
4400	4,3	137,02



Leitura PPT 4	leitura régua modelo (cm)	Pressão (kPa)
3990	1,1	38,61
3950	1,5	52,39
3880	1,9	66,03
3800	2,3	79,54
3750	2,6	89,59
3690	3	102,86
3650	3,3	112,72
3595	3,6	122,51
3550	3,8	128,99
3500	4	135,44
3460	4,2	141,85
3400	4,5	151,41
3380	4,7	157,73
3310	5	167,16
3270	5,2	173,41
3230	5,4	179,61



## ANEXO 02 - PARÂMETROS REOLÓGICOS

Apesar do comportamento de fluxos de detritos submarinos estar altamente associado à reologia do material, este assunto é brevemente abordado neste trabalho. Os estudos reológicos são escopo de uma tese de doutorado associada ao mesmo projeto de pesquisa. Apesar disso, foram realizados ensaios reológicos em todas as misturas utilizadas na modelagem centrífuga. Os ensaios reológicos foram realizados utilizando um reômetro rotativo fabricado pela *Brookfield Engineering Laboratories* (Figura 1a). O controle de temperatura era realizado por um sistema composto por um módulo de manutenção e controle de temperatura (Figura 1b), responsável por controlar e regular a temperatura do fluido termostático circulante. O bombeamento, a cápsula (Figura 1c) e a jaqueta térmica (Figura 1d), por onde circula o fluido termostático responsável pela manutenção da temperatura do solo, também fazem parte do sistema de controle da temperatura. Para a determinação da tensão de escoamento e viscosidade das misturas foram utilizadas geometrias do tipo cilindros concêntricos (Figura 2).

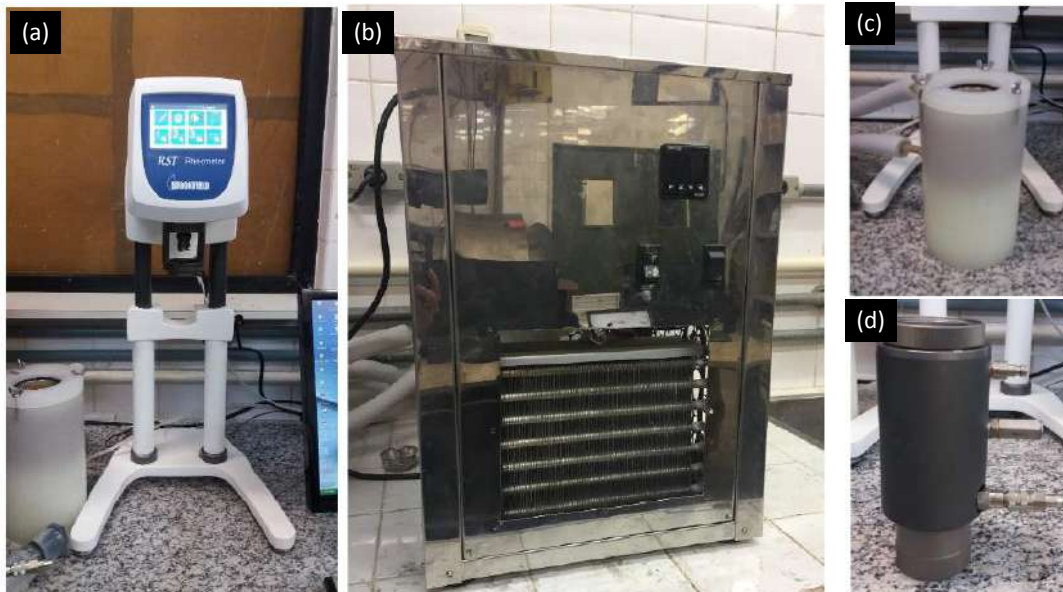


Figura 1 - Equipamentos utilizados nos ensaios reológicos (a) Reômetro rotativo (b) Módulo de manutenção e controle da temperatura (c) Cápsula de controle da temperatura (d) Jaqueta térmica



Figura 2 - Geometria de cilindros concêntricos

O tratamento dos dados para a obtenção da curva de escoamento, bem como a definição do melhor modelo reológico foi realizado com a ajuda do *software Rheo3000* que acompanha o equipamento. A Figura 3 apresenta a representação gráfica de alguns modelos reológicos.

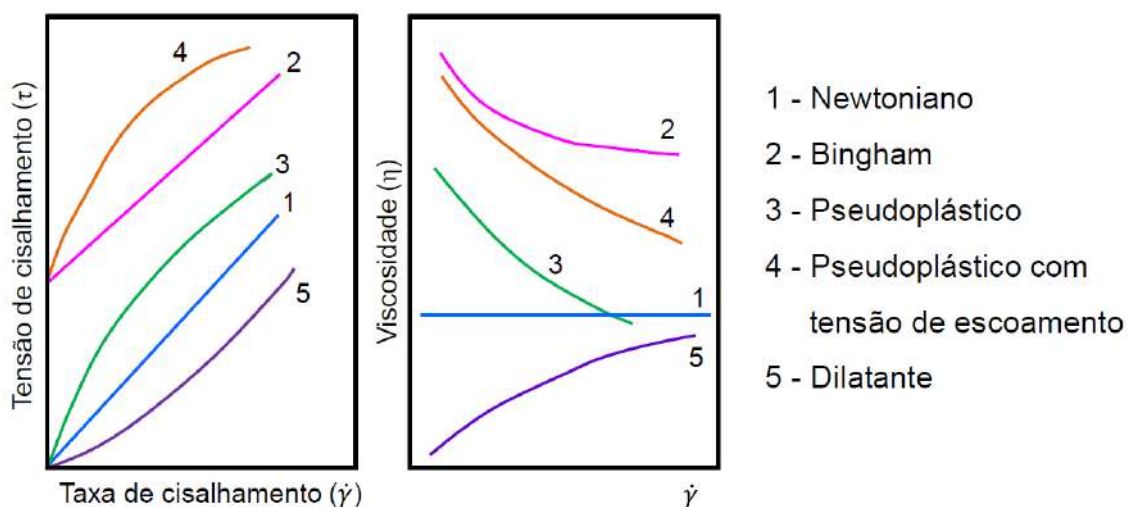


Figura 3 - Comportamento reológico dos fluidos (PILEGGI, 2001)

Em comparação com outros modelos mais complexos, o modelo de Bingham tem a vantagem de usar apenas dois parâmetros reológicos, tensão de escoamento  $\tau_0$  e viscosidade  $\mu$ , e portanto foi o modelo adotado na obtenção dos parâmetros reológicos.



Os fluidos de Bingham são caracterizados por uma curva de fluxo representada por uma reta com intercepto no eixo da tensão de cisalhamento (tensão de escoamento). O material representativo desse modelo apresenta um comportamento mais parecido com um sólido do que com um fluido. A formulação matemática simplificada deste modelo reológico é dada por:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

Onde  $\tau_0$  é a tensão de escoamento,  $\mu$  é a viscosidade e  $\dot{\gamma}$  representa a velocidade de cisalhamento (Figura 4).

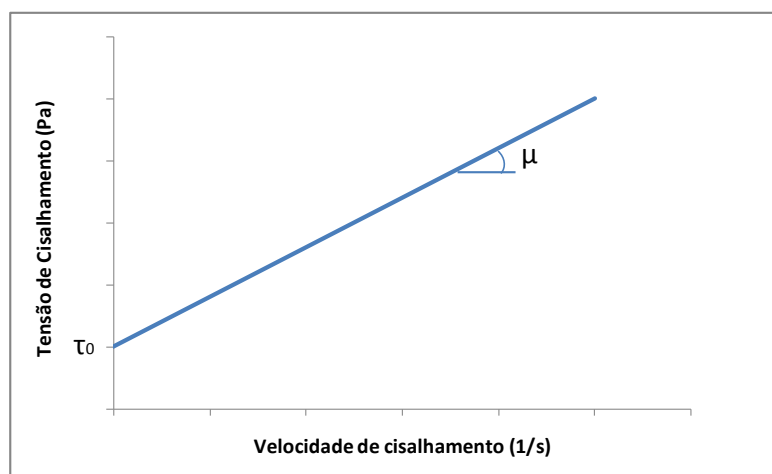


Figura 4 - Modelo reológico de Bingham