

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

CONTRIBUIÇÃO DO GRUPO DE PESQUISA RMVP* PARA O ENTENDIMENTO DE *ROLL WAVES* EM CORRIDAS DE LAMA

Geraldo de Freitas Maciel¹; Carlos Roberto Minussi²; Milton Dall'Aglio Sobrinho³; Cláudio Kitano⁴; Fabiana de Oliveira Ferreira⁵; Guilherme Henrique Fiorot⁶; Evandro Fernandes da Cunha⁷; Everaldo Leandro de Moraes⁸

RESUMO – Esta comunicação científica tem por objetivo trazer uma reflexão e também um posicionamento mais tecnicista do estado da arte no Brasil, concernente a riscos e catástrofes naturais. A equipe **RMVP** da Unesp – Ilha Solteira tem enveredado esforços no desenvolvimento de modelos matemáticos, numéricos e físicos para corrida de lamas com presença de instabilidades (*roll waves*) evoluindo em canais, encostas ou corredores de lavas torrenciais. A corrida de lamas é modelada a partir das equações clássicas de Cauchy com a inclusão do tensor viscoplástico de Herschel-Bulkely a 03 parâmetros. Um primeiro modelo 1-D é apresentado como algoritmo simples e eficaz na reprodução das instabilidades presentes nas corridas de lama, quando confrontado a dados físicos colhidos em laboratório, sob condições controladas. O grupo **RMVP** já disponibiliza aparato experimental eficaz para a geração e medição de *roll waves*.

ABSTRACT– The goal of this scientific work is to propose a reflection and a more technical view of the state-of-the-art in Brazil concerning risks and natural hazards. The **RMVP** team from Unesp – Ilha Solteira, has been focusing in develop mathematical, numerical and physical models for mudflows with presence of instabilities (*roll waves*) on open channels, cliffs or torrential lava corridors. The mudflow model is based on the classic Cauchy's equations inserting the Herschel-Bulkley viscoplastic tensor (3 parameters). An initial 1-D model is presented, showing a simple and efficient algorithm for the reproduction of such instabilities present on mudflows, when confronted to physical results taken in laboratory under controlled conditions. The **RMVP** team counts with an operational experimental set-up capable of reproduce and measure *roll waves*.

Palavras-Chave – corridas de lama, fluidos hiperconcentrados, Herschel-Bulkley, *roll waves*.

* **RMVP** : Grupo de Pesquisa em **Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos** certificado pelo CNPq/Unesp que atua tanto na caracterização reológica de fluidos hiperconcentrados como materiais compósitos de base cimentícia.

1) Dep. de Eng. Civil – FEIS-UNESP, Alameda Bahia, 550, Ilha Solteira - SP, (18) 3743-1207, maciel@dec.feis.unesp.br

2) Dep. de Eng. Elétrica – FEIS-UNESP, Campus III, Ilha Solteira - SP, (18) 3743-1225, minussi@dee.feis.unesp.br

3) Dep. de Eng. Civil – FEIS-UNESP, Alameda Bahia, 550, Ilha Solteira - SP, (18) 3743-1112, milton@dec.feis.unesp.br

4) Dep. de Eng. Elétrica – FEIS-UNESP, Campus III, Ilha Solteira - SP, (18) 3743-1225, kitano@dee.feis.unesp.br

5) Dep. de Eng. Elétrica – FEIS-UNESP, Campus III, 15385-000, Ilha Solteira - SP, (18) 3743-1347, fabiana.of@gmail.com

6) Dep. de Eng. Mecânica – FEIS/UNESP, Av. Brasil Centro, 56, 15385-000, Ilha Solteira - SP, (18) 3743-1558, ghfiorot@aluno.feis.unesp.br

7) Dep. de Eng. Mecânica – FEIS/UNESP, Av. Brasil Centro, 56, 15385-000, Ilha Solteira - SP, (18) 3743-1558, evandrofernandesc@gmail.com

8) Dep. de Eng. Elétrica – FEIS-UNESP, Campus III, 15385-000, Ilha Solteira - SP, (18) 3743-1347, elmoraes@dee.feis.unesp.br

1. INTRODUÇÃO

As catástrofes naturais, largamente noticiadas nestes últimos anos, produzem alterações significativas no funcionamento de uma comunidade ou sociedade. Áreas, muitas vezes representadas por um evento extremo, podem interagir com condições vulneráveis, provocando prejuízos de ordem material, humana, sócio-econômica ou ambiental de grandes proporções. Em função da amplitude do acidente, além do socorro imediato tanto para salvar vidas quanto atender às necessidades humanas vitais, algumas vezes há a necessidade de assistência externa para a reabilitação da comunidade atingida. Por áreas entende-se mudanças climáticas, correspondentes a variações do clima durante um longo período de tempo; ou eventos naturais extremos, devido a ocorrências de valores climáticos/meteorológicos acima (ou abaixo) do valor máximo (ou mínimo) observado para aquele evento.

Em áreas onde não há ocupação humana, ou seja, onde não há qualquer exposição a estes eventos, eles não adquirem a categoria de desastre e são simplesmente eventos naturais, podendo ser de origem climática, sísmica, meteorológica. O tipo e a gravidade dos impactos decorrentes de eventos extremos climáticos não dependem apenas do evento em si, mas também da exposição a eles, traduzida de forma global pela função vulnerabilidade. A gestão dos riscos¹ e a adaptação às mudanças climáticas devem, portanto, se concentrar na redução da exposição, ou seja da vulnerabilidade, como elemento indutor no aumento da resiliência aos impactos desfavoráveis potenciais dos eventos extremos, uma vez que estes riscos não podem ser totalmente eliminados.

Particularmente no Brasil, temos nos deparado com sucessivos eventos naturais como inundações e deslizamentos de terra nas épocas de chuvas (Figura 1), traduzidos em alta exposição e vulnerabilidade ao evento natural climático. E mais recentemente, até mesmo pequenos tornados e furacões. No que diz respeito aos deslizamentos de terra, a ocupação desorganizada de áreas de riscos nos morros e pés de montanhas, aliada à intensificação das chuvas, conduz a cenários catastróficos, onde a associação perigo-vulnerabilidade é concretizada com infeliz sucesso. Existe ainda uma baixa capacidade de adaptação da população brasileira às modificações climáticas e eventos extremos, o que conduz não só a uma baixa resiliência como também à redução da capacidade de explorar essa nova realidade.

Podemos recordar rapidamente os últimos eventos que ocorreram, acontecimentos que a mídia registrou como “tragédias anunciadas”. Apenas no começo do ano de 2011, resultado de enchentes e deslizamentos, na região serrana do estado do Rio de Janeiro, os números foram assustadores: 844 mortos, 449 desaparecidos, 8.777 desabrigados e mais de 20 mil desalojados

¹ “O risco, objeto social, define-se como a percepção do perigo, da catástrofe possível. Ele existe apenas em relação a um indivíduo e a um grupo social ou profissional, uma comunidade, uma sociedade, que o apreende por meio de representações mentais e com ele convive por meio de práticas específicas. (...) O risco é a tradução de uma ameaça, de um perigo para aquele que está sujeito a ele e o percebe como tal.” Yvette Veyret - Paris X - Nanterre

(Balanço divulgado pela Defesa Civil Estadual do Rio de Janeiro em 28/01/2011). As consequências do mau gerenciamento e da falta de políticas de segurança são fatais e trágicas. Dessa forma, exemplos não faltam para dizer que o Brasil não é um país sem riscos naturais. Vale lembrar, ainda no estado do Rio de Janeiro, o deslizamento de terra no morro da Carioca em Angra dos Reis, no início de 2010. Os acontecimentos de mesma natureza ocorridos em Santa Catarina e Minas Gerais vêm se somar ao número de vítimas e prejuízos de monta que atingem números preocupantes e que só corroboram o uso ainda desajustado, desgovernado de políticas públicas, até mesmo míope do estado brasileiro na gestão de riscos, sejam eles naturais, objeto deste trabalho, ou tecnológicos.



Figura 1 - Catástrofes naturais no Brasil: uma realidade a ser transformada. (a) Cidade de Cataguases afetada pelo rompimento da barragem de rejeito da Indústria Cataguazes de Papel, em 2003; (b) Deslizamento de terra em Blumenau, Santa Catarina, 2008; (c) Escorregamento de lama (*mudflow*) em Nova Friburgo, Rio de Janeiro, 2011.

É bem verdade que catástrofes desta natureza têm sido resolvidas através de medidas paliativas e pouco eficazes, que dificilmente recuperam os prejuízos sofridos pelas famílias atingidas. Medidas corretivas diminuem os efeitos, mas não evitam os acidentes, e dada a condição que muitos brasileiros vivem, medidas de prevenção e de gestão devem urgentemente ser aplicadas para evitar maiores danos à população.

É sobre este enfoque que o grupo de pesquisa do CNPq **RMVP** – Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos / UNESP – Ilha Solteira – vem já há alguns anos trabalhando em pesquisa científica, desenvolvendo e aprimorando modelos matemáticos e numéricos de escorregamentos de lama e produzindo métodos experimentais de simulação, com o objetivo de constituir ferramentas mais eficazes para a representação destes fenômenos e a conseqüente melhoria da descrição, equacionamento e métodos de prevenção de catástrofes desta natureza.

2. O FENÔMENO *ROLL WAVES* EM CORRIDAS DE LAMA

Dentre os tipos existentes de riscos naturais associados a movimento de massa (Iverson, 1997), dá-se enfoque neste trabalho aos escoamentos hiperconcentrados e *mudflows*. Uma aproximação mecanicista para estes fenômenos utiliza de modelos hidráulicos para a modelagem matemática, principalmente por auxiliarem o estudo de configurações instáveis de superfície livre que podem surgir na vizinhança do regime uniforme, detectando, pois, a formação e propagação de instabilidades, como frentes de ondas e *roll waves*. Este último fenômeno, normalmente presenciado em estruturas artificiais e fluidos newtonianos, tais como vertedouros de barragens (Dressler, 1949), pode também aparecer em ambientes naturais e escoamentos de diversos tipos de fluidos (Ng e Mei, 1994; Maciel, 1997; Liu e Mei, 1994; Coussot, 1994; Balmforth e Mandre, 2004, Maciel et al., 2011). Estas instabilidades são traduzidas como fluxos intermitentes, com eventuais transbordamentos dos canais onde ocorrem, favorecem a incorporação de detritos e material lamoso, aumentando, assim, o poder destrutivo do fenômeno que pode, quando aliados a estruturas civis com baixa manutenção e/ou comunidades de baixa resiliência, acarretar um cenário de catástrofe ainda maior. Catástrofes desta categoria, como as corridas de lama, são freqüentes e facilmente ilustrados através de eventos desastrosos em todo o mundo (Zanuttigh e Lamberti, 2007), no entanto a geração de instabilidades (*roll waves*) na superfície livre pode, na maioria dos casos, como já citado, agravar as conseqüências do fenômeno, ainda que não totalmente equacionado. As características destas instabilidades (amplitude, comprimento e velocidade de propagação) são rotineiramente estimadas matematicamente (através de soluções analíticas e/ou numéricas), no entanto raramente se encontram dados da natureza e dados experimentais.

2.1. Evidências do fenômeno

Relatos na Nova Zelândia, China e Suíça confirmam a presença de formação de frentes de onda em fluxos detríticos e lamosos e, inclusive, o surgimento de trens de onda, compostos por sucessivas frentes, com períodos de ondas estimados da ordem de minutos. A altura destas frentes também é estimada, bem como sua velocidade. A caracterização destes acontecimentos auxilia a modelagem e o desenvolvimento de técnicas capazes de prever o real cenário que irá se desenrolar durante eventos desta natureza.

Dentro deste contexto, cabe exemplificar um destes acontecimentos que ocorreu em Acquabona, na Itália, em 1998. A bacia de drenagem de Acquabona contém um canal de 1300 m onde ocorrem freqüentes fluxos detríticos. Por ocorrerem em um local bem delimitado, fenômenos desta natureza podem ser oportunamente registrados, como aqueles ocorridos nos dias 25 e 27 de

Julho de 1998 e 17 de Agosto do mesmo ano. Nas estações de medições instaladas ao longo do canal efetuaram-se medidas de pluviosidade e, através de sonda ultrassônicas, medidas de altura do fluxo em função do tempo. A figura 2 apresenta dados obtidos nos três dias de evento, caracterizando a altura das frentes de onda em função do tempo.

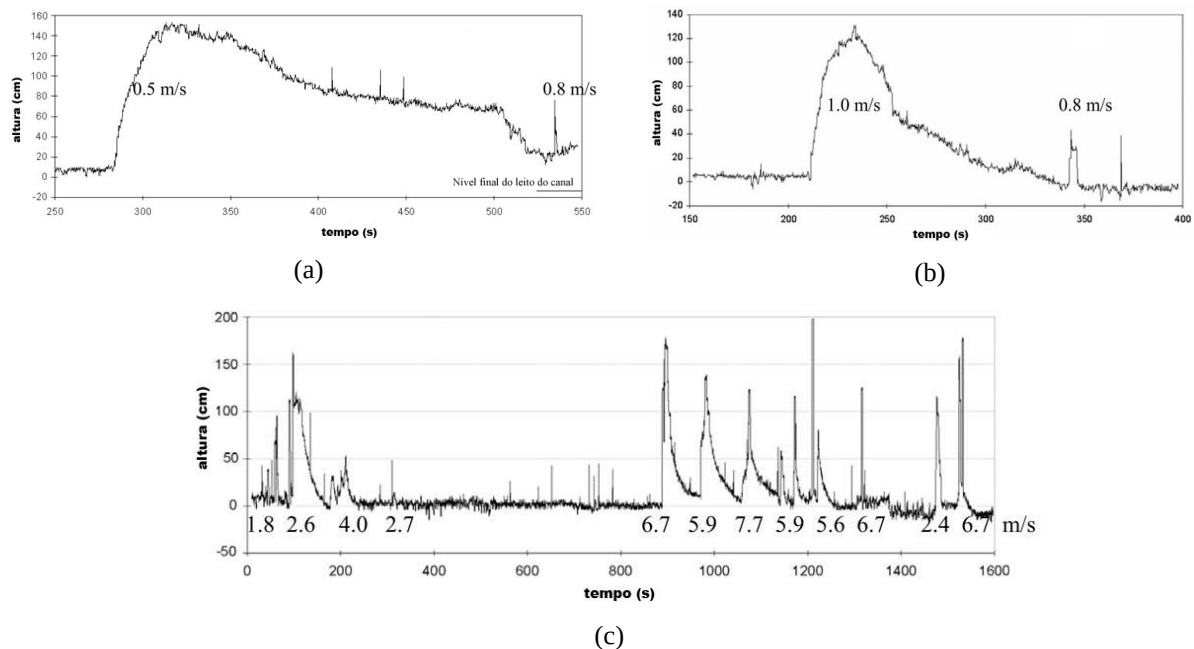


Figura 2 – Medidas hidrográficas feitas em uma das estações de medidas situada na parte inferior do canal de Acquabona, Itália. Medidas tomadas no eventos de (a) 25 de Julho; (b) 27 de Julho e (c) 17 de Agosto, de 1998.

Adaptado de Zanuttigh e Lamberti (2007).

Os eventos de julho de 1998 (Figuras 2.a e 2.b) podem ser considerados de pequeno porte, tendo em vista o pequeno volume de material deslocado (600-700 m³ e 400-500 m³ em 25 e 27 de Julho, respectivamente) e a baixa velocidade de movimentação das frentes (< 1 m/s). As tempestades precedentes aos eventos de intensidades próximas, apenas se diferenciando pela precipitação anterior: no dia 25, as tempestades foram precedidas por 14 mm de precipitação durante 7 horas, enquanto que no dia 27 as tempestades ocorreram após 46 horas sem chuva.

Por sua vez, o evento do dia 17 de Agosto (Figura 2.c) foi desencadeado por uma intensa tempestade (25,4 mm de precipitação em 30 minutos), causando um depósito de material sedimentar/rochoso de aproximadamente 8000 m³. Enquanto os eventos de julho foram de curta duração (4 e 2 minutos, respectivamente) e apresentaram um pico único, o evento do dia 17 de Agosto teve duração de 38 minutos e mais de 20 ondas (com evidências de *roll waves*) se formaram, com velocidade de propagação de 2 a 8 m/s. Este tipo de informação em nosso país ainda é escasso, se não inexistente. Nessa direção, e já investindo há alguns anos em modelos matemáticos como aquele exposto no item 3 deste artigo, Maciel et al. (1997) gera, a partir de modelo matemático de sua autoria, frentes de onda dessa natureza em escoamentos de fluidos de

propriedades binghamianas (efeito de tensão crítica não nulo), conforme ilustra a figura 3, que identifica um acréscimo da amplitude da onda e sua antecipação com relação a sua presença em fluidos newtonianos.

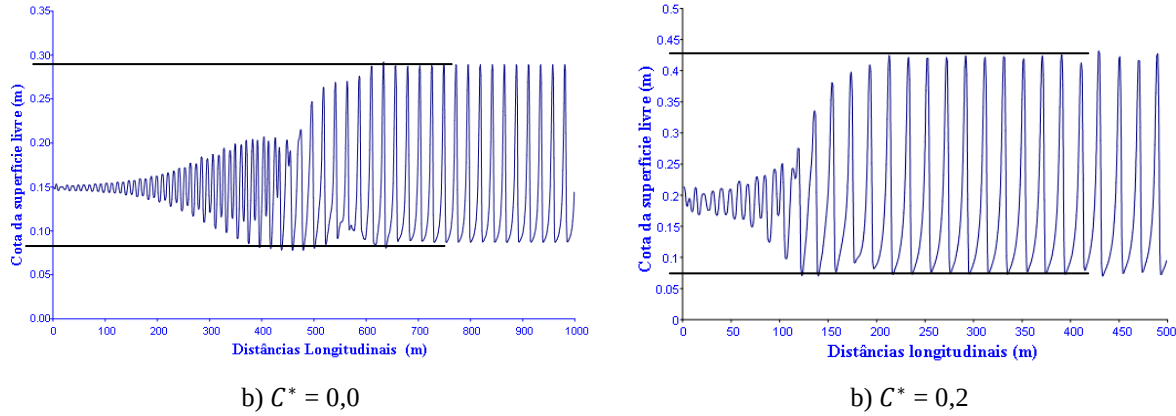


Figura 3 – Perfil da superfície livre resultante de uma perturbação senoidal de períodos 1,00 s, 1,57 s e 3,14 s e amplitudes distintas em escoamento de fluido a) newtoniano e b) binghamiano.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DE *ROLL WAVES* EM CORRIDAS DE LAMA

Muitos modelos numéricos e analíticos têm sido desenvolvidos (Van Asch *et al.*, 2007; Zanuttigh e Lamberti, 2007) na tentativa de estimar propriedades e prever como se comportariam escoamentos dessa complexa mistura de sedimentos e água.

Dentro da equipe **RMVP**, optou-se por uma representação matemática capaz de simular a geração de instabilidades tipo *roll waves* não apenas com base na reologia de Herschel-Bulkley a 03 parâmetros, mas também em fluidos mais simples como os newtonianos, *power-law*, etc. (Ferreira, 2007). A formulação parte de uma visão mecanicista que trata o fluxo de lama como um material contínuo, fluido incompressível homogêneo, escoando em um canal inclinado (θ graus) aberto onde a força motriz do problema é a força peso ($\vec{g}$). Utiliza-se das equações de conservação clássicas de Cauchy (Equações 1 e 2), onde o modelo reológico apropriado é inserido na parte viscosa ($\vec{\tau}$) do tensor de tensões.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{U} \otimes \vec{U}) \right) = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} \quad (2)$$

Nas equações acima, ρ é a massa específica do fluido; $\vec{U}$ é o vetor velocidade; p é a pressão, que deverá ser considerada hidrostática; e $\vec{\nabla}$ é operador vetorial nabla.

Assim constituídas, as equações de Cauchy são promediadas na vertical e adimensionalizadas, culminando em um sistema livre de escalas onde coeficientes adimensionais como número de Froude (Fr) vem traduzir o balanço entre forças de inércia e gravitacionais e o adimensional C^* , a ponderação entre a ação da tensão de escoamento ou crítica do fluido e a tensão de cisalhamento no fundo. O índice de escoamento do fluido (n) mede, de certa forma, o grau de comportamento não-newtoniano do mesmo. As equações (3) e (4) mostram esses resultados onde h é a altura da lâmina do escoamento e u a velocidade média. Um fator de correção do *momentum* α é adicionado para representar a variação do perfil de velocidade u do escoamento na vertical (profundidade do escoamento).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} h \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \alpha u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{h}{Fr^2} \frac{\partial h}{\partial x} + (1 - \alpha) u \frac{\partial h}{\partial t} = \\ = h - C^* - (1 - C^*) \left[uh \frac{(1 - C^*)(n + 1 + nC^*)}{(h - C^*)((n + 1)h + nC^*)} \right]^n \end{aligned} \quad (4)$$

As equações (3) e (4) do problema, de natureza matemática hiperbólica, representam a conservação da massa e do *momentum* em escalas adimensionais, (Ferreira, 2007). Após manipulações algébricas, é possível representar a variação da superfície livre em um sistema móvel de coordenadas ($x' = x - Ut$) onde U representa a velocidade de propagação das *roll waves* na superfície livre. A presença destas instabilidades é limitada pelo número de Froude do escoamento base, que deve ser superior a um valor mínimo, Fr_{min} , obtido após um estudo minucioso de análise de estabilidade linear (Maciel *et al.*, 2012):

$$Fr > Fr_{min} = \frac{\vartheta}{\sqrt{\varphi^2 - 2\alpha\varphi\vartheta + \alpha\vartheta^2}} \quad (5)$$

com $\varphi(n, C^*) = (n + 1)(2n + 1)/(n + 1 + nC^*)$ e $\vartheta(n, C^*) = n(1 - C^*)$.

Através destes procedimentos, consegue-se representar a variação de superfície livre por uma equação diferencial de primeira ordem, expressa por (Ferreira, 2007):

$$\frac{\partial h}{\partial x'} = \frac{h - C^* - (1 - C^*) \left[(1 + U(h - 1)) \left(\frac{1 - C^*}{h - C^*} \right) \left(\frac{n + 1 + nC^*}{(n + 1)h + nC^*} \right) \right]^n}{\left((\alpha - 1)U^2 - \frac{\alpha(1 - U)^2}{h^2} + \frac{h}{Fr^2} \right)} \quad (6)$$

$$\equiv \frac{F(h)}{G(h)}$$

Onde U é calculada por:

$$U = \alpha + \left(\alpha^2 - \alpha + \frac{1}{Fr^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Apesar das particularidades da equação (6) (singularidade, não periodicidade), ela pode ser resolvida numericamente, culminando em uma resposta consoante com resultados experimentais e outros trabalhos presentes na literatura. Assim, o perfil de ondas é descrito como:

$$h(x') = \int_{j\lambda}^{(j+1)\lambda} \frac{F(h)}{G(h)} dx', \quad \text{for } j \in \mathbb{Z}_+ \quad (8)$$

onde o comprimento de onda λ é dado a partir da equação (9) entre a lâmina baixa h_1 , estimada no domínio onde a integral da equação (6) é real e positiva, e a lâmina alta h_2 :

$$\lambda = \int_{h_1}^{h_2(h_1)} \frac{G(h)}{F(h)} dh \quad (9)$$

Graficamente, pode-se representar o perfil de ondas como mostra a figura 4.

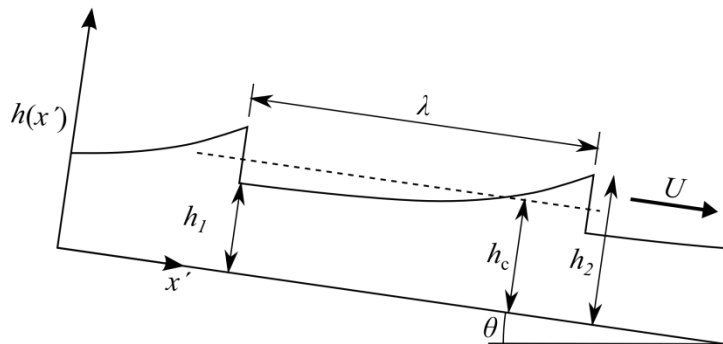


Figura 4 – Esquema representativo de *roll waves* em regime permanente. Principais características físicas estão em destaque. Atenta-se sobre a altura crítica h_c que é um ponto do domínio onde uma forte singularidade da equação (6) está presente.

4. PROPOSTA DO MODELO NUMÉRICO

Para simular escoamentos com superfície livre (fronteira com forma deformável que constitui ele própria uma incógnita do problema) é necessário recorrer ao método VoF (*Volume of Fluid*), o que corresponde a considerar o problema bifásico com uma fase de ar (gás ideal) e outra de líquido. O método permite detectar a interface entre os dois fluidos através do cálculo da fração de volume que evolui desde 0 (ar) a 1 (líquido), e a isolinha de 0,5 é utilizada para identificar a superfície livre.

Neste trabalho, faz-se a opção pelos seguintes esquemas:

- para o algoritmo de acoplamento entre velocidade e pressão, utilizou-se o SIMPLEC (Van Doormal e Raithby, 1984) adaptado para simulações transientes. Este acoplamento é feito através de uma relação que permite corrigir a pressão a cada nova iteração de velocidade. O algoritmo tem uma estrutura similar ao SIMPLE (Patankar e Spalding, 1972), diferindo apenas na expressão da correção da pressão. A interpolação da pressão é feita pela rotina PRESTO aconselhado pelo manual do FLUENT para modelação de escoamentos com superfície livre;

- para o termo convectivo das equações, utilizou-se modelagem pelo esquema Power-Law, de 2ª ordem, que permite obter melhores resultados em comparação com a utilização de esquemas de ordem inferior (por exemplo, UDS de 1ª ordem);

- para o cálculo na interface o método VoF implícito foi empregado, adotando o esquema HRIC para o transporte de massa, aconselhado pelo FLUENT.

4.1. Estudo de Caso

Com base nos modelos estabelecidos anteriormente, um primeiro estudo de caso para fluido de reologia newtoniana foi desenvolvido com o propósito de avaliar a representatividade dos mesmos. Nesta seção, o problema será apresentado e os passos para a inserção do mesmo no modelo numérico.

O problema escolhido foi um escoamento em regime laminar, portanto não iremos optar por módulos de turbulência. O fluido em questão será uma solução aquosa de glicerina, de propriedades semelhantes àquelas apresentadas no trabalho de Liu e Gollub (1994), onde foi possível verificar a formação de *roll waves* experimentalmente:

- Fluido newtoniano e incompressível de viscosidade cinemática, ν , igual a $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Massa específica da solução, ρ , definida a partir da concentração: 1090 kg/m^3 ;

O modelo reológico de fluido newtoniano é inserido no tensor de tensões, o que irá permitir a obtenção das equações de Navier-Stokes, por fim.

Para a discretização do domínio de cálculo, o programa Gambit foi utilizado para a construção da malha. Na fase líquida, a malha foi refinada, principalmente na entrada e saída. Na fase de ar, a malha foi construída grosseiramente, obedecendo às condições de contorno do problema, de tal forma que constituísse um escoamento em canal onde a fase de ar não alterasse substancialmente a dinâmica do fluido. A simulação tem as condições definidas como mostra a figura 5.

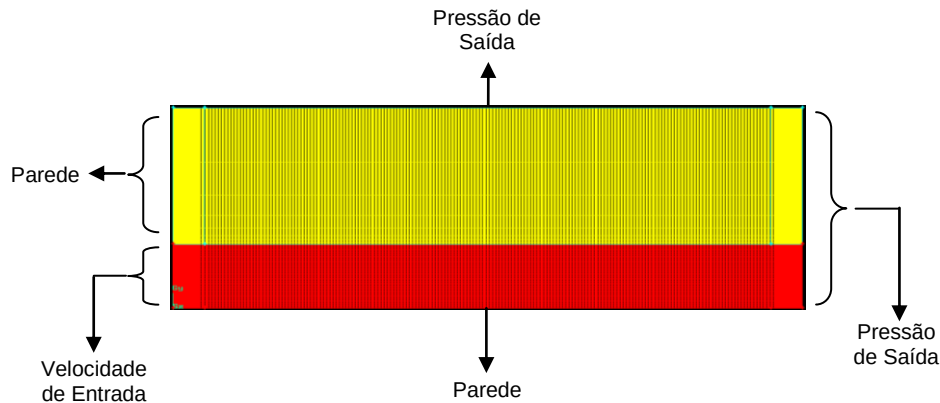


Figura 5 – Geometria do problema escolhido e condições de contorno.

As hipóteses e condições de contorno assumidas para esse caso são:

- Escoamento em duas dimensões sobre um canal retangular, com 0,003 metros de fluido teste e 3 metros de comprimento;
- Saída: Pressão prescrita (Pressão de Saída = Pressão atmosférica);
- Entrada: Apenas a solução tipo é introduzida no domínio, com velocidade média dada pela equação:

$$\bar{u} = \frac{gh_0^2 \sin \theta}{3\nu} \quad (10)$$

com h_0 sendo a lâmina inicial de entrada, correspondente ao regime uniforme no canal, igual a 0,003 metros para o caso; g , a aceleração da gravidade, $9,8 \text{ m/s}^2$; θ , a inclinação do canal, $2,5^\circ$. A velocidade média, com estes parâmetros, é de $0,128 \text{ m/s}$.

Com os parâmetros acima fixados, uma pequena perturbação senoidal de período $T = 0,6 \text{ s}$ foi imposta na velocidade de entrada, com o propósito de avaliar qual seria a relação entre as instabilidades geradas e a fonte perturbadora. A velocidade de entrada é dada pela seguinte equação:

$$V = \bar{u} \left[1 + B \sin \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right] \quad (11)$$

onde B é a magnitude da perturbação, adotada como $B = 0,05$.

Com todos os parâmetros acima setados no programa, o problema é resolvido. O tempo de cálculo exigido pelo método é grande, pois é necessário um domínio extenso e bem refinado para que *roll waves* possam ser observadas de forma estável. A figura 6, mostra o resultado da simulação deste problema no instante $t = 10$ s, onde a partir de 2 metros as ondas se encontram estáveis, com comprimento de onda e amplitude bem definidos, $\lambda = 0,20$ metro e $\Delta h = 0,008$ metro, respectivamente.

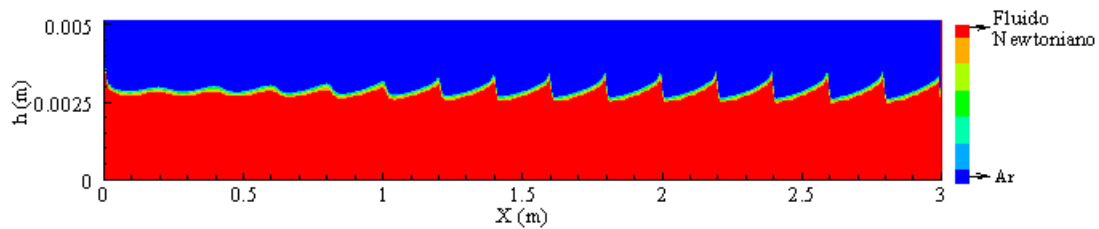


Figura 6 – Visualização instantânea espacial apresentando resultados de simulações de fluido newtoniano.

A figura 7, mostra a visualização temporal do fenômeno para um ponto do domínio de simulação ($x = 2,00$ m), onde as ondas já se encontram estáveis.

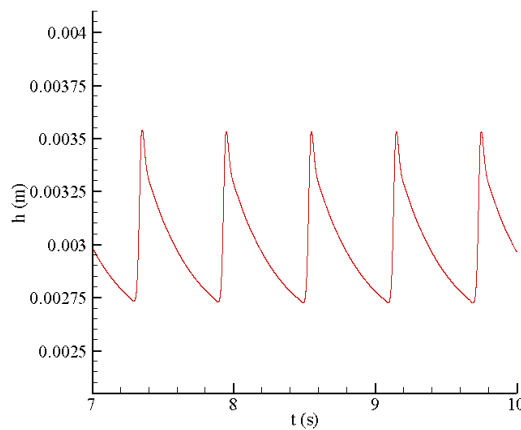


Figura 7 – Visualização temporal de *roll waves* para fluido newtoniano em $x = 2,00$ metros ($Fr = 0,75$).

Através da figura 7, percebe-se que o período da *roll waves* corresponde ao mesmo período de perturbação, $T = 0,6$ s. Desta forma, é possível calcular a velocidade de propagação das ondas, que para este caso é de $0,333$ m/s.

5. PROPOSTA DE MODELO FÍSICO PARA MEDIÇÃO DE *ROLL WAVES*

A primeira constatação empírica de *roll waves* foi efetuada por Cornish (1934) que registrou pela primeira vez o aparecimento destas ondas em um canal prismático artificial. Alguns anos mais tarde, os experimentos de Brock (1969) contribuíram para a compreensão das leis envolvidas no surgimento destas ondas através dos equipamentos da época. Muito são os trabalhos experimentais na literatura que relatam qualitativamente o surgimento e as condições de ocorrência deste fenômeno, sem entretanto quantificar estas ondas.

A grande dificuldade no estudo de *roll waves* surge exatamente na avaliação quantitativa de suas grandezas características (amplitude, comprimento de onda, velocidade de propagação) por conta de sua geometria (ondas íngremes, tipo dente de serra). Resultados experimentais de *roll waves* exigem dispositivos funcionais e precisos para que a medição de suas características seja feita adequadamente. Por um lado, a utilização de sistemas de medição intrusivos, tais como sondas capacitivas e resistivas, sensores de pressão, etc., podem capturar informações importantes do escoamento, entretanto interagem diretamente com ele, em algumas vezes comprometendo os resultados. Por outro, sistemas de medição não-intrusivos vem sofrendo constantes aprimoramentos tecnológicos, melhorando sua precisão e manuseio, facilitando e otimizando a medição.

Poucos são os trabalhos na literatura que buscam detalhar de maneira quantitativa as características deste tipo de fenômeno, constituindo uma lacuna na literatura específica. Um dos mais importantes trabalhos com esta tônica é o trabalho de Liu e Gollub (1994) que toma como base um escoamento em filme fino e aplica sobre ele uma perturbação de frequência conhecida. Através de um sistema de medição fotométrico baseado no princípio da fotoluminescência informações de amplitude comprimento de onda e velocidade de propagação eram obtidas (Figura 8).

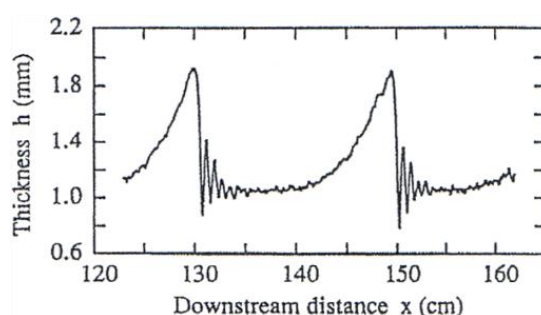


Figura 8 – Perfil de ondas (Distância longitudinal x por altura de lâmina h) obtido em escoamento de solução de água-glicerina (fluido newtoniano), a partir de medição do regime uniforme perturbado; frequência de perturbação = 1,5 Hz; $Re = 29$ (Número de Reynolds) e $6,4^\circ$ de inclinação. (Adaptado de Liu e Gollub (1994))

Trabalhos recentes utilizam técnicas baseadas em teorias de propagação de ondas eletromagnéticas para obter informações precisas sobre escoamentos em filmes finos. Este tipo de

escoamento é largamente empregado por químicos, físicos e engenheiros em diversos processos industriais (crescimento de cristais, revestimento eletroquímico, condensadores, etc.) que procuram desenvolver sistema de medição precisos e capazes de verificar as características deste escoamento a fundo. Alguns destes métodos como reflexão total interna e externa, absorção luminosa e interferometria são capazes de oferecer informações com excelente precisão para configurações distintas de escoamento. No que diz respeito ao método de absorção luminosa, o trabalho dos gregos Mouza *et al.* (1999) mostra claramente que através de um método simples e intuitivo bons resultados podem ser obtidos para filmes finos, em regime laminar.

A partir deste estado da arte e de diversos outros experimentos da literatura específica, o grupo de pesquisa **RMVP** envereda esforços nesta lacuna, com o propósito de aferir resultados quantitativos que possam servir para a otimização dos métodos matemáticos e numéricos até então elaborados.

5.1. Sistema de medição fotométrico: Método da Absorção Luminosa

Quando a luz atravessa um meio, seja ele sólido, líquido ou gasoso, as ondas eletromagnéticas que a compõe irão sofrer interferência do meio, sendo dispersas ou absorvidas. Um feixe luminoso de potência inicial I_0 ao atravessar um meio irá perder sua intensidade dependendo das características deste meio segundo a Lei de Lambert:

$$I = I_0 e^{-\gamma h} \quad (12)$$

onde I é a intensidade luminosa em uma dada altura h , sendo γ o coeficiente de extinção do meio.

Se desconsiderarmos os efeitos de dispersão, então a equação (12) pode ser simplificada apenas para o efeito de absorção luminosa, devido a presença de uma concentração C de um material de absorvidade molecular ε em solução:

$$I = I_0 e^{-\varepsilon Ch} \quad (13)$$

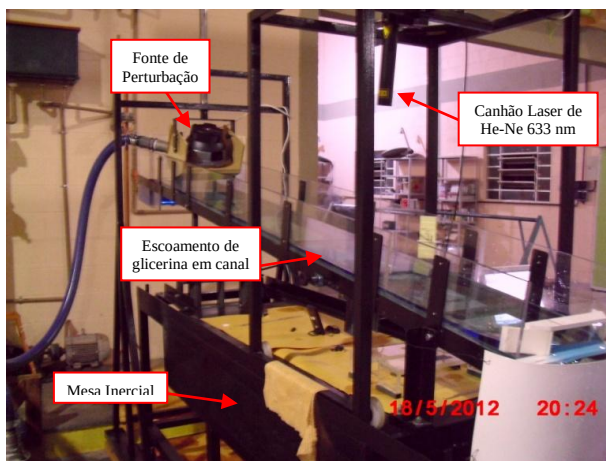
A partir disso, obtém-se uma grandeza derivada chamada Transmittância, T , e outra chamada absorbância, A :

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\varepsilon Ch} \quad (14)$$

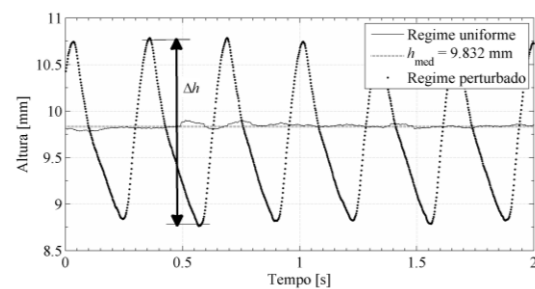
$$A = -\log T = \varepsilon Ch \quad (15)$$

Algumas dificuldades podem surgir durante o desenvolvimento de um aparato baseado neste princípio que residem nos fenômenos de interface (reflexão e refração) que fatalmente irão afetar o resultados finais caso não sejam devidamente evitados. A maioria dos sistemas assim constituídos é utilizado em medição de filmes em regime laminar, garantindo boa resposta dos sensores empregados, e pouca influência dos fenômenos de interface. No que compete à precisão deste tipo montagem experimental, há relatos de precisão da ordem de 0,005 mm (Barter *et al.*, 1993).

A partir de estudos aprofundados na literatura específica, o grupo **RMVP** iniciou em 2010 a construção de um aparato experimental para simulação de escoamentos em filme fino sujeito ao surgimento de instabilidades tipo *roll waves* (Fiorot *et al.*, 2012). O experimento foi concebido com base no clássico trabalho de Liu *et al.* (1993), suportado em uma mesa inercial, capaz de absorver vibrações parasitas do meio externo. O canal foi construído com o fundo de vidro, apoiado sobre uma estrutura metálica e instalado com conectores de borracha. O sistema de medição é composto por fotodetectores Thorabs DET10A/M e Newport 818-SL, alinhados com um diodo-laser de He-Ne, de 633 nm e 12 mW. O sistema de aquisição via PC é acoplado diretamente à saída de um osciloscópio digital. A fonte de perturbação foi dimensionada para baixas frequências controladas a partir de um gerador de funções. Um corante especial é adicionado ao fluido de teste de modo que o coeficiente de extinção da luminosidade no fluido seja apropriado para aferir medições de lâmina que devem ser da ordem de milímetros.



(a)



(b)

Figura 9 – a) Aparato experimental instalado e operante nas dependências do Laboratório de Hidrologia e Hidrometria – LH² da FEIS-UNESP (para visualizar ensaio acesse http://youtu.be/JGPxIt_V3eI), e b) resultados preliminares para um ensaio com glicerina pura, vazão de 0,75 l/s. Amplitude $\Delta h \approx 2$ mm.

Testes iniciais com fluido newtoniano (glicerina pura) já mostram que o experimento é capaz de detectar com clareza o padrão formado pelas ondas (figura 9.b)). Futuramente, testes com fluido

não-newtoniano (solução aquosa de carbopol, polímero de propriedades não-newtonianas – Minussi e Maciel, 2012) deverão ser conduzidos a fim de reproduzir os fluidos lamosos.

5.2. Verificação experimental

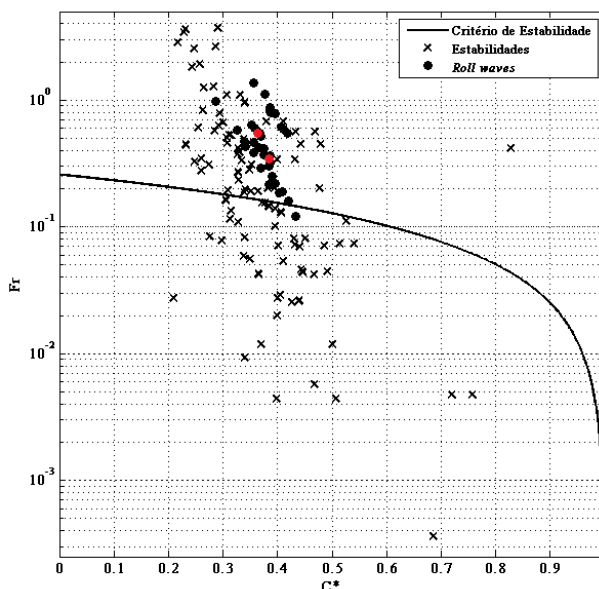


Figura 10 – Comparação entre o critério de estabilidade de Ferreira (2007) e os resultados experimentais de Coussot (1994). Instabilidades de superfície livre tipo *roll waves* são apenas visualizadas acima do valor limite para o número de Froude. Os pontos em vermelho indicam as simulações da figura 11.

Conforme elucidado anteriormente, medidas experimentais de *roll waves* ainda são escassas na literatura em grande parte pela dificuldade em se controlar a formação das instabilidades e em medi-las, já que se trata de um choque (propriedade de descontinuidade) da superfície livre do escoamento. Com base em um experimento de grande valor apontado na literatura do assunto, os resultados encontrados por Coussot (1994) identificaram situações do escoamento onde estas instabilidades surgiam sem, entretanto, deixar explícito qualquer informação sobre as características dessas ondas (velocidade de propagação, amplitude e comprimento de onda). Coussot desenvolveu testes com fluidos hiperconcentrados de matriz argilosa, compostos por soluções de água e argila em diversas concentrações, em um canal de secção retangular de 8 metros de comprimento e 0,6 metros de largura. Seu fluido-tipo caracterizava as lavas torrenciais que atingiam as regiões montanhosas da França. A partir desta montagem, Coussot observou para que condições o escoamento se tornaria instável, gerando *roll waves*, conforme a figura 10, sobre a qual traçamos o critério de estabilidade definido por Ferreira (2007).

Dentro do modelo desenvolvido, estes pontos experimentais, favoráveis à geração de *roll waves*, podem ser testados numericamente e verificados como pontos onde *roll waves* são admitidas como soluções para os parâmetros de entrada, como ilustra a figura 11.

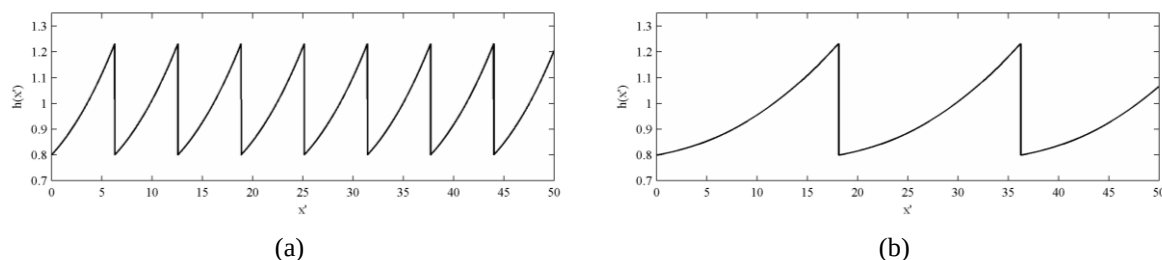


Figura 11 – Simulações numéricas de resultados experimentais de Coussot (1994), a partir da figura 10 (pontos em vermelho): (a) $C^* = 0,37$ and $Fr = 0,52$; (b) $C^* = 0,39$ and $Fr = 0,36$.

6. PERSPECTIVAS

As vertentes apresentadas nesta comunicação vêm sendo desenvolvidas há cerca de 5 anos pela equipe **RMVP**, que conta também com outro modelo matemático, de segunda ordem, capaz de simular o mesmo fenômeno para fluidos de Bingham. Resultados representativos destes modelos já foram largamente divulgados pela equipe, agora voltando-se mais para a lacuna que ainda persiste na literatura: dados experimentais. Atualmente, o modelo físico descrito está em fase de testes onde *roll waves* deverão ser testadas e medidas através de um sistema fotométrico (método da absorção luminosa). Além disso, métodos de simulação numérica direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*) baseados em volumes finitos estão sendo testados. Apesar do tempo computacional elevado requerido neste último método, há uma necessidade em se comparar estes resultados com os demais, convergindo para uma melhor representação global das corridas de lama com presença de eventuais instabilidades na superfície livre. Pretende-se, a partir destes modelos, verificada a reprodutibilidade do fenômeno, auxiliar melhor a estimativa dos riscos associados, principalmente aqueles onde *roll waves* podem, em muito, potencializá-los.

BIBLIOGRAFIA

- BALMFORTH, N. J.; MANDRE, C. (2004). “*Dynamics of roll waves*”. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 514, p. 1–33.
- BARTER, J. D.; BEACH, K. L.; LEE, P. H. Y. (1993). “*Collocated and simultaneous measurement of surface slope and amplitude of water waves*”. *Review of Scientific Instruments*, v. 64, n. 9, p. 2661–2665.

- BROCK, R. R. (1969). "*Development of roll-wave trains in open channels*". Journal of Hydraulics Division, v. 95, p. 1401–1427.
- CORNISH, V. (1934). "*Ocean waves and Kindred Geophysical phenomena*". [S.l.]: Cambridge University Press.
- COUSSOT, P. (1994). "*Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel*". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 32, n. 4, p. 535–559.
- DRESSLER, R. F. (1949). "*Mathematical solution of the problem of roll waves in inclined open channels*", Communs Pure Applied Mathematics, v. 2, p. 149–194.
- FERREIRA, F. O. (2007). "Abordagem matemática de *roll waves* em escoamentos hiperconcentrados com superfície livre", Ilha Solteira/SP, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Eng. de Ilha Solteira, UNESP.
- FIOROT, G. H., MACIEL, G. F.; KITANO, C. (2012). "*Mathematical model and experimental proceedings to determine roll waves in open channels*", aguardando publicação no Journal Engenharia Térmica - RETERM, 8 p.
- IVERSON, R. M. (1997). "*The physics of debris flows*", Reviews of Geophysics, v. 35, n. 3, 245.
- LIU, K.; MEI, C. C. (1994). "*Roll waves on a layer of muddy fluid flowing down a gentle slope – a bingham model*". Physics of Fluids, v. 6, p. 2577–2590.
- LIU, J.; GOLLUB, J. P. (1994). "*Solitary wave dynamics of film flows*". Physics of Fluids, v. 6, p. 1702–1712.
- LIU, J.; PAUL, J. D.; GOLLUB, J. P. (1993) "*Measurement of the primary instabilities of film flows*". Journal of Fluid Mechanics, v. 250, p. 69–101.
- MACIEL, G. F.; FERREIRA, J. P.; FIOROT, G. H. (2012). "*Control of instabilities in non-Newtonian free surface fluid flows*", em segunda revisão para publicação no Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, p. 1-30.
- MACIEL, G. F.; VILA, J. P.; MARTINET, G. (1997). "*Roll wave formation in the non-newtonian flows*", XIV COBEM, Bauru, SP, Brasil.
- MINUSSI, R. B.; MACIEL, G. F. (2012). "*Numerical experimental comparison of dam break flows with non-Newtonian fluids*", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v.34, p. 168-178.
- MOUZA, A. A.; VLACHOS, N. A.; PARAS, S. V.; KARABELAS, A. J. (1999). "*Measurement of liquid film thickness using a laser light absorption method*", Experiments in Fluids, ASCE, v. 28, p. 355–359.
- NG, C. O.; MEI, C. C., (1994). "*Roll waves on a shallow layer of mud modelled as power-law fluid*", J. Fluid Mechanics, v. 263, p. 151–183.
- PATANKAR, S V.; SPALDING, D. B. (1972). "*A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-dimensional Parabolic Flows*", Int. J. Heat Mass Transfer, v. 15, p. 1787.

VAN DOORMAL, J. P.; RAITHBY, G. D. (1984). “*Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows*”, Numer. Heat Transfer, v. 7, pp. 147-163.

ZANUTTIGH, B.; LAMBERTI, A. (2007). “*Instability and surge development in debris flows*”, Reviews of Geophysics, v. 45, n. 3, p. 1–45.

AGRADECIMENTOS - À FAPESP, ao CNPq e ao projeto CAPES/FCT pelas bolsas de Mestrado e Doutorado, e pelos financiamentos de projeto. Ao Laboratório de Hidrologia e Hidrometria da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp, onde os experimentos são sediados.