

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 30/07/2019.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

ANDRÉ LUIS TONIATI

ESCOAMENTOS PULSANTES COM SUPERFÍCIE LIVRE:
CARACTERIZAÇÃO E SUA AÇÃO EM FUNDO DE CANAIS

ILHA SOLTEIRA

2018



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

ANDRÉ LUIS TONIATI

ESCOAMENTOS PULSANTES COM SUPERFÍCIE LIVRE:
CARACTERIZAÇÃO E SUA AÇÃO EM FUNDO DE CANAIS

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Área de conhecimento: Ciências Térmicas.

Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel

Orientador

Dr^a. Fabiana de Oliveira Ferreira

Coorientador

ILHA SOLTEIRA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Toniati, André Luis.

T665e Escoamentos pulsantes com superfície livre: caracterização e sua ação em fundo de canais / André Luis Toniati. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
120 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Ciências Térmicas e Mecânica dos Fluidos, 2018

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel
Co-orientador: Fabiana de Oliveira Ferreira
Inclui bibliografia

1. Roll Waves. 2. Fluidos newtonianos. 3. Fluidos não-newtonianos.
4. Corridas de lama. 5. Tensão de cisalhamento no Fundo. 6. Transporte de sedimentos.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESCOAMENTOS PULSANTES COM SUPERFÍCIE LIVRE:
CARACTERIZAÇÃO E SUA AÇÃO EM FUNDO DE CANAIS

AUTOR: ANDRÉ LUÍS TONIATI

ORIENTADOR: GERALDO DE FREITAS MACIEL

COORIENTADORA: FABIANA DE OLIVEIRA FERREIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: CIÊNCIAS TÉRMICAS pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RENE ORLANDO MEDRANO TORRICOS
Departamento de Física / Universidade Federal de São Paulo


Prof. Dr. GUILHERME HENRIQUE FIOROT
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ilha Solteira, 30 de julho de 2018

A familiares e amigos que sempre torceram por mim. Em especial, aos meus pais, pela torcida de camarote.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Onofre Francisco Toniati e Maria Andrea B. Toniati, por sempre estarem ao meu lado, me apoiando e orientando na minha jornada.

Aos meus irmãos, Eugênio e Josana, pelo carinho e amor fraterno compartilhado ao longo da vida.

Aos meus amigos e companheiros que conviveram comigo neste período.

À minha namorada Giulia Marcucci Peron, pelo carinho e paciência nesta etapa.

Ao Professor Geraldo de Freitas Maciel, pela orientação, ensinamentos e oportunidades, que contribuíram para minha formação tanto profissional como pessoal, além do despertar do saber e questionar.

À Professora Fabiana de Oliveira Ferreira, pela coorientação, pelas conversas, pelas muitas horas dedicadas, pelo incentivo, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Guilherme Henrique Fiorot, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A todos do grupo de pesquisa RMVP, em especial ao João e Renan, pelas inúmeras contribuições e cafezinhos da tarde, que tornaram este período muito mais agradável.

Aos funcionários da UNESP de Ilha Solteira, na parte técnica e administrativa, que cooperaram para realização deste projeto.

Por fim, não menos importante, agradeço a Deus, por iluminar o meu caminho e ter colocado pessoas especiais em minha vida que sou tão grato.

“(...) que o objetivo da vida não é maximizar o lucro, mas minimizar o tédio.”
(José Augusto Penteado Aranha)

RESUMO

No contexto de Desastres “Naturais”, as corridas de lama têm sido objeto de estudo devido ao seu poder erosivo e, muitas vezes, destrutivo, acarretando perdas materiais vultosas e ceifando vidas. Nestes escoamentos, quando em condições favoráveis de vazão, inclinação e reologia do fluido, podem surgir instabilidades que se propagam em forma de trem de ondas na superfície, denominadas *roll waves*. A literatura acerca do assunto trata, geralmente, dos critérios de geração, estabilidade, e determinação das características principais do fenômeno, como amplitude, comprimento e celeridade de onda. Nesta dissertação buscou-se estudar a tensão de cisalhamento no fundo na presença de *roll waves*, em duas vertentes: a primeira apresenta as *roll waves* em água limpa, baseando-se no trabalho clássico de Dressler (1949); a segunda, dando continuidade aos trabalhos do Grupo de Pesquisa de Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos (Grupo RMVP), focou no estudo de *roll waves* desenvolvendo-se em fluidos do tipo Herschel-Bulkley, em duas situações - canal de fundo impermeável e fundo com condição de permeabilidade, grande contribuição desta dissertação. Os modelos matemáticos foram desenvolvidos com base nas equações de águas rasas, cuja implementação numérica permitiu confrontar resultados experimentais e numéricos, que apresentaram boa aderência. Para o modelo com condição de permeabilidade no fundo, verificou-se a influência do fator de porosidade nas características das *roll waves* (amplitude, comprimento e celeridade de onda), tendo sido constatado que a amplitude de onda geralmente aumenta, enquanto seu comprimento e celeridade diminuem quando da presença deste fator. Por fim, avaliou-se a tensão de cisalhamento no fundo, cujos resultados apontam, para fundos impermeáveis, incremento em relação ao escoamento base (sem presença de *roll waves*) de 12% a 27%, dependendo, respectivamente, da natureza laminar/turbulenta e da dinâmica (número de Froude) do escoamento. Quando levada em conta a porosidade do leito, o incremento de tensão de cisalhamento no fundo pode atingir valores bem mais significativos (60% a 100%).

Palavras-chave: *Roll waves*. Fluidos newtonianos. Fluidos não-newtonianos. Corridas de lama. Tensão de cisalhamento no fundo. Transporte de sedimentos.

ABSTRACT

Mudflows have been the focus of studies because of their erosive ability and often destructive power, causing material losses and taking away lives. Under favorable conditions of discharge, slope, disturbance, and rheology, these flows can develop a specific type of instability that is propagated downstream as shock waves, called roll waves. Most of the roll waves literature provides information on generation criteria, stability, and information of amplitudes, wavelengths, and celerity. This work brings a study of bottom shear stress in pulsating flows (roll waves) in 2 parts. In the first part, we present roll waves in clean water, based on Dressler's work. In the second part, we continue the works of research team about roll waves developing in Herschel-Bulkley fluid under 2 conditions: impermeable bottom and porous bed. The mathematical models developed were based on shallow water equations. The results of these models were compared to Fluent and experimental results, showing a good agreement. For the mathematical model with porous bed condition, we evaluated the effect of porosity factor in properties of roll waves, and we observed that the amplitude of the roll wave usually increases, whereas the length and the celerity decrease with the presence of this factor. Finally, considering an impermeable bottom, the bottom shear stress presented an increase of 12% to 27%, depending on nature (laminar-turbulent) and dynamics (Froude number) of flow. Taking in account a porous bed, the bottom shear stress reached more significant values (60% to 100%).

Keywords: Roll waves. Newtonian fluids. Non-newtonian fluids. Mudflows. Bottom shear stress. Sediment transport.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cidade de Teresópolis, após deslizamentos de terra e corridas de lama em 2011.	19
Figura 2 – Exemplos de aparecimento de <i>roll waves</i> em canais artificiais. (a) <i>Roll waves</i> em escoamentos lamosos, canal na França; (b) <i>Roll waves</i> em água, no canal de Merligen, Suíça; (c) Instabilidades de superfície livre em fluido não-Newtoniano; (d) <i>Roll waves</i> em gel de carbopol em rampa experimental.	21
Figura 3 – Registro de monitoramento de profundidade de escoamento, em Acquabona, com a presença do fenômeno <i>roll wave</i> após tempestade de 17 de agosto de 1998.	22
Figura 4 – Perfil das “mínimas” <i>roll waves</i> , isto é, a menor amplitude, celeridade e comprimento de onda, obtidas por Ng e Mei (1994) para 3 casos de número de Froude, quais sejam: $Fr \rightarrow \infty$ (.....), $Fr = 1$ (—) e $Fr = \sqrt{2}$ (---). Sendo $h(\xi)$: lâmina do escoamento, $\bar{u}(\xi)$: velocidade média e $\tau_b(\xi)$: tensão de cisalhamento no fundo.	28
Figura 5 – Exemplo de estudo, relacionando <i>roll waves</i> e transporte de sedimentos (região hachurada).	29
Figura 6 – Perfil no espaço (z) x tempo (t), de partículas de SiC (carbeto de silício) obtidos a partir de imagens de uma câmera posicionada na lateral da rampa experimental alinhada com a inclinação da mesma. O eixo vertical é a espessura do escoamento livre e no eixo horizontal o tempo de experimento para um período de 4 segundos em (a) e 2 segundos em (b). A linhas preta representa a posição do fundo rugoso em relação ao fluxo. As linhas horizontais representam partículas depositadas.	31
Figura 7 – Esquema indicando duas possíveis representações de ondas granulares de erosão/deposição em uma plano inclinado em ζ com a horizontal. O material em repouso está hachurado em cinza, a espessura do escoamento, normal à direção z é considerado em (a) a altura $h(x, t)$ das partículas entre a superfície livre $s(x, t)$ e a base da onda granular em $z = b(x, t)$, ou (b) a profundidade $h(x, t)$ entre a superfície livre e o fundo. O perfil típico de velocidade $u(x, t)$ ao longo da profundidade é representado. A solução da onda considera que esta se move com velocidade contante u_w , e erode uma camada estática de sedimentos de espessura h_+ a sua frente, depositando a mesma espessura atrás.	31

Figura 8 – Esquema geral para representação do escoamento. Na qual x é a coordenada na direção longitudinal do canal, z a coordenada na direção transversal do canal, h a profundidade do escoamento, h_1 a profundidade referente à “cava” da onda (lâmina baixa), h_2 a profundidade referente à “crista” da onda (lâmina alta), U a celeridade da onda, λ o comprimento de onda, g a aceleração da gravidade, u a componente da velocidade na direção x , w a componente da velocidade em z , θ a inclinação do canal.	33
Figura 9 – Esquema para o problema estudado, fluido não-Newtoniano tipo Herschel-Bulkley escoando em um meio permeável.	46
Figura 10 – Fluxograma para método numérico utilizado no Modelo 1	60
Figura 11 – Fluxograma para o método numérico utilizado no Modelo 2	60
Figura 12 – Comparação entre o Modelo 1 , Ensaio Experimental (BROCK, 1969) e Fluent [®] . No eixo da ordenada, amplitude de onda adimensionalizada pela lâmina do escoamento base, e na abscissa o comprimento de onda normalizado.	63
Figura 13 – Tensão de cisalhamento máxima em função do número de Froude.	64
Figura 14 – Perfil de <i>roll waves</i> obtido a partir do Modelo 1 utilizando-se dado experimental obtido por Fiorot (2016). Sendo h : lâmina do escoamento, \bar{u} : velocidade média e τ_f : tensão de cisalhamento no fundo.	65
Figura 15 – Valores de tensão cisalhamento máxima para $C = 0$ e n variando de 0,1 a 1,0.	67
Figura 16 – Valores de tensão cisalhamento máxima para $C = 0,1$ e n variando de 0,1 a 1,0.	67
Figura 17 – Valores de tensão cisalhamento máxima para $C = 0,2$ e n variando de 0,1 a 1,0.	68
Figura 18 – Valores de tensão de cisalhamento máxima para $n = 0,6$ e C variando de 0 a 0,2.	68
Figura 19 – Amplitudes de onda: M2FI vs. <i>software</i> Fluent [®] vs. experimental em laboratório (MACIEL et al., 2017)	70
Figura 20 – Profundidades, velocidade média e tensão de cisalhamento no fundo, para os dois modelos: M2FI e Fluent [®]	71
Figura 21 – Valores de Fr_{\min} em função do fator porosidade (γ).	72
Figura 22 – Fr_{\min} em função do fator porosidade γ para $n = 0,6$	73
Figura 23 – Valores de amplitude de onda (Δh) em função de Fr	74
Figura 24 – Valores de comprimento de onda (λ) em função de Fr	75
Figura 25 – Valores de celeridade (U) em função de Fr	76

Figura 26 – Perfil de onda, perfil de velocidade média e tensão de cisalhamento no fundo de canal do Caso 1, com parâmetros $n = 0,4$, $C = 0$, $Fr \rightarrow \infty$ para $\gamma = 0$, $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,4$, $\gamma = 0,8$	79
Figura 27 – Perfil de onda, perfil de velocidade média e tensão de cisalhamento no fundo de canal do Caso 2, com parâmetros $n = 0,4$, $C = 0,2$, $Fr \rightarrow \infty$ para $\gamma = 0$, $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,4$, $\gamma = 0,8$	79
Figura 28 – Perfil de onda, perfil de velocidade média e tensão de cisalhamento no fundo de canal do Caso 3, com parâmetros $n = 0,4$, $C = 0$, $Fr = 1$ para $\gamma = 0$, $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,4$, $\gamma = 0,8$	80
Figura 29 – Perfil de onda, perfil de velocidade média e tensão de cisalhamento no fundo de canal do Caso 4, com parâmetros $n = 0,4$, $C = 0,2$, $Fr = 1$ para $\gamma = 0$, $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,4$, $\gamma = 0,8$	80
Figura 30 – Perfil de onda, perfil de velocidade média e tensão de cisalhamento no fundo de canal do Caso 5, com parâmetros $n = 0,4$, $C = 0$, $Fr = \sqrt{0,2}$ para $\gamma = 0$, $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,4$, $\gamma = 0,8$	81
Figura 31 – Perfil de de onda, perfil de velocidade média e tensão de cisalhamento no fundo de canal do Caso 6, com parâmetros $n = 0,4$, $C = 0,2$, $Fr = \sqrt{0,2}$ para $\gamma = 0$, $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,4$, $\gamma = 0,8$	81
Figura 32 – Análise da amplitude de onda Δh em função de $h_1 = h_{\min}$, para diversos parâmetros (C , n , γ , Fr).	83
Figura 33 – Envoltória superior e inferior de Δh em função de $h_1 = h_{\min}$	84
Figura 34 – Comparativo entre a envoltória superior e inferior de Δh em função de $h_1 = h_{\min}$ com aquela obtida por Fiorot (2012).	85
Figura 35 – Aproximação por interpolação dos resultados de celeridade (U) apresentados quando da presença da porosidade ($\gamma \neq 0$) em função do número de Froude (Fr). Em vermelho, resultado para um fluido Newtoniano com fundo impermeável.	86
Figura 36 – Aproximação por interpolação dos resultados de comprimento de onda (λ) apresentados quando da presença da porosidade ($\gamma \neq 0$) em função do número de Froude (Fr). Em vermelho, resultado para um fluido Newtoniano com fundo impermeável.	87
Figura 37 – Máxima tensão de cisalhamento no fundo em função do número de Froude, para $C = 0$	88
Figura 38 – Máxima tensão de cisalhamento no fundo em função do número de Froude, para $C = 0,1$	89
Figura 39 – Máxima tensão de cisalhamento no fundo em função do número de Froude, para $C = 0,2$	90
Figura 40 – Máxima tensão de cisalhamento no fundo em função do número de Froude.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Esquema numéricos utilizados no Fluent®.	61
Tabela 2 – Dados de ensaio experimental realizado por Brock (1969) utilizados como parâmetros de entrada no Modelo 1 e no Fluent.	62
Tabela 3 – Valores de lâminas baixa e alta, amplitude, período e celeridade para modelos testados.	63
Tabela 4 – Dados experimentais de medidas de parâmetros de escoamento realizadas por Fiorot (2016) para um canal com fundo impermeável.	65
Tabela 5 – Valores de amplitude, comprimento de onda e celeridade para modelos testados.	69
Tabela 6 – Dados do ensaio experimental realizado por Maciel et al. (2017) utilizados como parâmetros de entrada no M2FI e no Fluent.	70
Tabela 7 – Parâmetros de entrada nos estudos de caso; valores máximos e mínimos para o perfil de onda, velocidade média de escoamento e tensão de cisalhamento no fundo; e comprimento de onda.	78

LISTA DE SÍMBOLOS

Fr	número de Froude
μ	viscosidade dinâmica ou absoluta de fluido Newtoniano
μ_n	índice de consistência para fluido do tipo <i>Power Law</i>
μ_B	viscosidade plástica (fluido de Bingham)
n	índice de escoamento do fluido
x	coordenada na direção longitudinal do canal
z	coordenada na direção vertical do canal
U	velocidade de propagação ou celeridade da <i>roll wave</i>
λ	comprimento de onda da <i>roll wave</i>
g	aceleração da gravidade
u	componente da velocidade na direção x
w	componente da velocidade na direção z
u_p	componente da velocidade na direção x do meio permeável
w_p	componente da velocidade na direção z do meio permeável
h	profundidade do escoamento
h_c	profundidade crítica do escoamento
h_1	profundidade referente à “cava” da <i>roll wave</i> (lâmina baixa)
h_2	profundidade referente à “crista” da <i>roll wave</i> (lâmina alta)
h_{\min}	menor lâmina baixa possível da <i>roll wave</i>
Δh	amplitude de onda ($h_2 - h_1$)
\bar{u}	velocidade média do escoamento da componente x na vertical
\bar{u}_c	velocidade média do escoamento da componente x na vertical na seção crítica do escoamento
\bar{u}_1	velocidade média do escoamento da componente x referente à profundidade da “cava” da onda (h_1)

\bar{u}_2	velocidade média do escoamento da componente x referente à profundidade da “crista” da onda (h_2)
ξ	sistema móvel de coordenadas apresentado no modelo de Ng e Mei (1994)
Sh	número de Shields
h_+	espessura granular depositada no modelo de Edwards e Gray (2015)
θ	inclinação do canal em relação à horizontal
t	tempo
ρ	massa específica
\vec{V}	vetor velocidade
L	comprimento característico longitudinal
l	largura do canal
P	pressão total
\vec{F}_g	força peso por unidade de massa
\vec{F}_{res}	forças resistivas por unidade de massa
x'	abscissa no sistema móvel de coordenadas
$()^*$	variável adimensional
ψ	parâmetros do escoamento e fluido
C_f	coeficiente de fricção que depende da rugosidade do canal
r^2	coeficiente de fricção que depende da rugosidade do canal
C_h	coeficiente de Chézy
f	coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach
q	vazão relativa adimensional, que em regime permanente e uniforme é uma constante
m	inclinação do canal no modelo de Dressler (1949)
$()_0$	variável em condições de regime uniforme
S_f	declividade da linha de energia

τ_b	tensão de cisalhamento no fundo de canal no modelo de Ng e Mei (1994)
τ_f	tensão de cisalhamento no fundo do canal
τ_c	tensão limite de escoamento
τ_{xz}	tensão de cisalhamento na direção x devido a um gradiente em z
$\tau_{f\min}$	tensão de cisalhamento mínima no fundo
$\tau_{f\max}$	tensão de cisalhamento máxima no fundo
K_n	índice de consistência do fluido de Herschel-Bulkley
α	coeficiente de distribuição de velocidade, na vertical
C	tensão limite de escoamento adimensional
χ	parâmetro adimensional relacionado ao fator de forma dos vazios e no meio permeável
κ	fator de permeabilidade modificado no meio
P_p	pressão total no meio permeável
κ_I	permeabilidade inercial
κ_K	permeabilidade intrínseca
Ω_f	relação entre o limite inercial e a resistência cinemática no meio poroso
z_0	altura da zona não-cisalhada (<i>plug flow</i>)
γ	parâmetro adimensional referente à permeabilidade no meio, relacionando parâmetros geométricos e do fluido
u_f	velocidade no fundo
\mathcal{H}	magnitude de perturbação
k_r	número de onda
k_i	taxa de amplificação no domínio do espaço
w_r	frequência de perturbação
w_i	taxa de amplificação no domínio do tempo
Fr_{\min}	número de Froude mínimo
Re	número de Reynolds do escoamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	23
1.2	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
2	ESTADO DA ARTE	25
2.1	ROLL WAVES	25
2.2	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	29
2.3	ROLL WAVES E O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	29
3	METODOLOGIA	32
3.1	MODELO GERAL	33
3.2	MODELO 1 (M1) - MODELO MATEMÁTICO CLÁSSICO DE <i>ROLL WAVES</i> EM ÁGUA	36
3.2.1	Equações motrizes	37
3.2.2	Mudança de referencial	37
3.2.3	Adimensionalização	37
3.2.4	Equação da <i>roll wave</i>	38
3.2.5	Determinação da celeridade	38
3.2.6	Condições de choque de Rankine-Hugoniot	39
3.2.7	Determinação da tensão de cisalhamento no fundo	40
3.2.8	Equações adimensionalizadas	40
3.3	MODELO 2 - MODELO MATEMÁTICO DO GRUPO RMVP: <i>ROLL WAVES</i> EM FLUIDOS DE HERSCHEL-BULKLEY, COM FUNDO IMPERMEÁVEL (M2FI)	41
3.3.1	Equações motrizes	42
3.3.2	Adimensionalização	42
3.3.3	Mudança de referencial	43
3.3.4	Equação da <i>roll wave</i>	43
3.3.5	Determinação da celeridade	43
3.3.6	Condições de choque de Rankine-Hugoniot	44
3.4	MODELO 2 - MODELO MATEMÁTICO: AS <i>ROLL WAVES</i> EM FLUIDOS DE HERSCHEL-BULKLEY, COM FUNDO PERMEÁVEL (M2FP)	44
3.4.1	Condições de contorno do problema	46
3.4.2	Perfil de velocidade	49
3.4.3	Perfil de velocidade média	49
3.4.4	Verificação de soluções “menos complexas”	50

3.4.5	Determinação da taxa de deformação	52
3.4.6	Obtenção da expressão da tensão de cisalhamento	52
3.4.7	Equações do modelo matemático, processos de promediação e adimensionalização	53
3.4.8	A equação da <i>roll wave</i>	55
3.4.9	A celeridade da <i>roll wave</i>	55
3.4.10	Determinação do número de Froude mínimo	56
3.5	MODELO NUMÉRICO	58
3.5.1	MATLAB®	58
3.5.2	Procedimento numérico para o modelo geral	59
3.5.3	Fluent®	60
3.6	DESENVOLVIMENTO DOS RESULTADOS	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	MODELO MATEMÁTICO CLÁSSICO DE <i>ROLL WAVES</i> EM ÁGUA - MODELO 1 (M1)	62
4.1.1	Comparação de resultado entre Modelo 1, resultados experi- mentais de Brock (1969) e Fluent®	62
4.1.2	Tensão de cisalhamento máxima em fundo de canais	63
4.1.3	Estudo de caso: o transporte de sedimentos a partir do Modelo 1	64
4.2	MODELO MATEMÁTICO DO GRUPO RMVP: <i>ROLL WAVES</i> EM FLUIDOS DE HERSCHEL-BULKLEY, COM FUNDO IMPERMEÁ- VEL (M2FI)	66
4.2.1	Análise da tensão de cisalhamento no fundo	66
4.2.2	Confrontação de resultados entre o Modelo 2 - com fundo impermeável (M2FI), simulação com o Fluent® e experimento em canal	69
4.3	MODELO MATEMÁTICO: AS <i>ROLL WAVES</i> EM FLUIDOS DE HERSCHEL-BULKLEY, COM FUNDO PERMEÁVEL (M2FP)	71
4.3.1	Análise em relação ao número de Froude mínimo	72
4.3.2	Análise com relação aos parâmetros de <i>roll waves</i>	73
4.3.3	Estudos de caso em função do número de Froude, tensão limite de escoamento e fator de porosidade.	77
4.3.4	Uma análise mais aprofundada	82
4.3.5	Tensão de cisalhamento no fundo	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	93
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1.1	Modelos com fundo impermeável	93
5.1.2	Modelo com fundo permeável/poroso	94

5.1.3	Vantagens e desvantagens dos modelos implementados	95
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
5.3	PRODUÇÃO CIENTÍFICA E TÉCNICA	96
	REFERÊNCIAS	97
	ANEXOS	103
	ANEXO A – REOLOGIA	105
	APÊNDICES	110
	APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO ALGÉBRICO - ESTABILIDADE LINEAR	112
	APÊNDICE B – RESULTADOS E DISCUSSÕES COMPLEMENTARES	117

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o meio ambiente vem sofrendo transformações como resultado de mudanças climáticas e ações antrópicas. Se muitas das ações antrópicas são profícuas e trazem benefícios ao homem e ao habitat, outras são indevidas, quando não, desastrosas¹. Ações antrópicas equivocadas e persistentes produzem sobre o meio, no médio e longo prazo, vulnerabilidades de ordens diversas que, somadas a ações de diversos agentes da natureza, potencializam riscos, gerando catástrofes.

No Brasil, os principais fenômenos relacionados a Desastres “Naturais”, são derivados da dinâmica externa da Terra, tais como, inundações/enchentes, escorregamentos de solos e/ou rochas, tempestades e secas prolongadas. Segundo dados do *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED* (2018), considerando o período de 1900 a 2018 e, apenas os desastres hidrológicos (inundações, enchentes e movimentos de massa), o Brasil ocupa o quinto lugar em ocorrência, com mais de 9 mil mortes e mais de 24 milhões de afetados, estando entre os dez primeiros no mundo em números de vítimas. Dentre estes tipos de desastres, os que ganham mais destaque, na região Sul e Sudeste do país, são as corridas de lama ao longo das encostas, que ocorrem após chuvas intensas (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

Ao traçar uma linha cronológica dos grandes Desastres “Naturais” no Brasil devido às corridas de lamas, pode-se destacar o evento ocorrido em Caraguatatuba/SP, em 1967, um dos mais antigos registrados, com cerca de 500 mortes e perdas significativas (REBELLO et al., 2012). Apesar de outros eventos semelhantes terem ocorrido, como os de Timbé do Sul/SC (1995), Região de Blumenau/SC (2008) e Angra dos Reis/RJ (2010), o de Caraguatatuba/SP foi considerado um dos mais catastróficos, até 2011, quando a Região Serrana do Rio de Janeiro foi protagonista de mais uma catástrofe. O acidente na Região Serrana do Rio de Janeiro (Figura 1), segundo observadores e estudiosos, foi resultado da confluência de três fatores: a ação meteorológica da Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS, a topografia acidentada com uma fina camada de solo saturado (devido a chuvas intensas que ocorreram momentos antes, de 200 a 300 mm em poucas horas) e, por último, concomitantemente, a ocupação desordenada do espaço e ações antrópicas errôneas. De acordo com balanço divulgado pela Defesa Civil Estadual do Rio de Janeiro, em 28 de janeiro de 2011, havia 8.777 pessoas desabrigadas, mais de 20 mil desalojadas, 950 mortos

¹ quando faz-se alusão à produção social de Riscos (CARMO; VALENCIO, 2014)

e mais de 430 desaparecidas (GUIDUGLI et al., 2012). Na mesma direção, porém por total ausência de governança, tem-se o acidente ocorrido em Mariana (Bento Rodrigues), em novembro de 2015, quando do rompimento da barragem de rejeito de mineração de Fundão, que mesmo com número de mortes reduzido (19 óbitos), foi considerado um mega desastre por causa dos impactos ambientais devastadores na biota de todo vale do Rio Doce e consequente alteração do modo de vida de cerca de um milhão de pessoas (MORGENSTERN et al., 2016).

Figura 1 – Cidade de Teresópolis, após deslizamentos de terra e corridas de lama em 2011.



Fonte: Motta (2011).

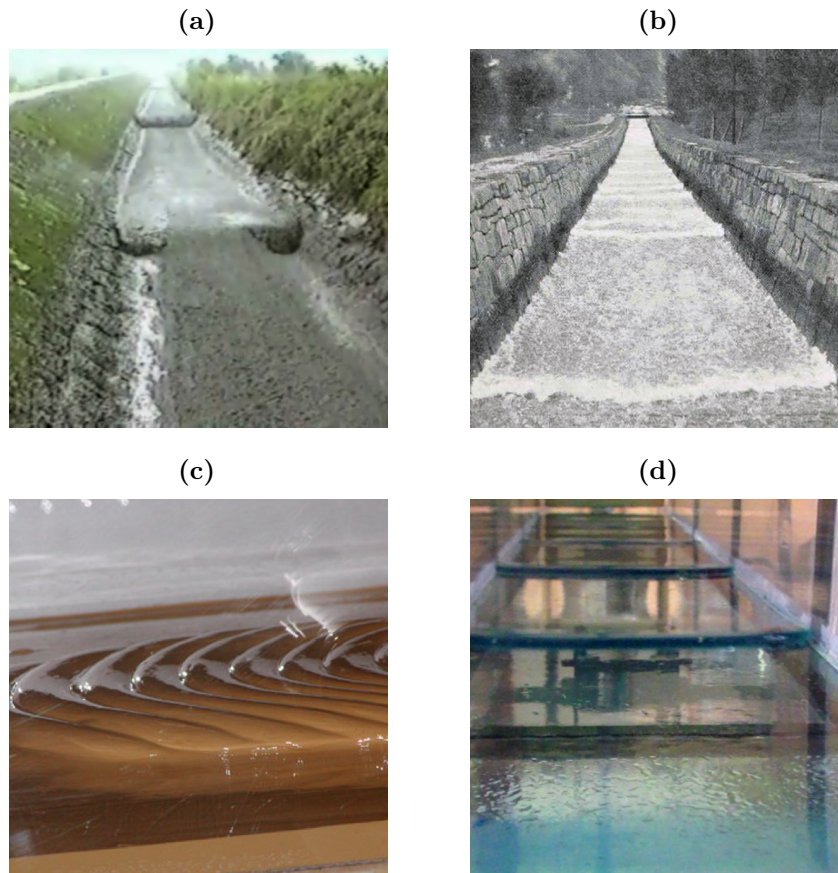
A respeito de políticas ambientais preventivas, a história tem demonstrado um padrão, isto é, para que haja mobilização, primeiro é necessário a ocorrência de grandes desastres ambientais com graves consequências e perdas de vidas humanas para, depois, buscar soluções (POTT; ESTRELA, 2017). De qualquer forma, assiste-se a uma mudança de paradigma, graças à implementação de Políticas Públicas Ambientais, com questionamentos mais amplos acerca dos Desastres “Naturais”. No Brasil, encontrou-se, em termos de ação governamental, após episódio de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro, um

primeiro projeto promissor, o Cemaden (Centro Nacional de Monitoramento de Alerta de Desastres Naturais), agência federal criada com o intuito de emitir alertas sobre a ocorrência de eventuais desastres em locais que podem colocar a vida das pessoas em risco. Compete ao Cemaden o desenvolvimento de pesquisas que auxiliem nas ações de mitigação e prevenção de Desastres “Naturais”, como modelos de previsão de eventos extremos e mudanças climáticas (PIVETTA, 2016). Ademais, parcerias internacionais têm sido criadas, como o projeto Gestão Integrada de Riscos em Desastres Naturais (Gides), parceria entre a Agência Brasileira de Cooperação (ABC) e a Agência de Cooperação Internacional do Japão (Jica), no intuito de formular estratégias, avaliar riscos, bem como recuperar e reconstruir áreas afetadas, tendo como projeto inicial o município de Blumenau que sofre, frequentemente, as consequências destes tipos de desastres (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM, 2018). Por fim, mesmo com políticas ambientais e preventivistas, observa-se que muitas das medidas utilizadas pelo poder público têm surtido pouco efeito. Deve-se, portanto, repensar um modelo de gestão e nas medidas de prevenção que devem ser aplicadas, de maneira a incorporar a cultura do risco e romper, por definitivo, o paradigma da tragédia anunciada. Dentro desta perspectiva, necessita-se fomentar ações integradas e multidisciplinares entre as Ciências Sociais, Exatas e de Engenharias, buscando trabalhar de forma mais colaborativa por uma engenharia social (humana).

Na contexto de Engenharia, as corridas de lama produzidas nos episódios supracitados apresentam, via de regra, matriz e reologia complexas, com presença de material argiloso e outros materiais de granulometria estendida, e com larga faixa de concentrações em volume ($10\% < C_v < 60\%$) conforme Coussot (1994), Maciel et al. (2009). Tais corridas, além de apresentarem frentes com potencial energético destrutivo, geralmente apresentam capacidade erosiva significativa com elevada produção de sedimentos. Ademais, durante a evolução dessas corridas, outros fenômenos agravantes podem ocorrer, como por exemplo, o surgimento de instabilidades na superfície livre que, em condições favoráveis de vazão e inclinação dos corredores de deslizamento, se propagam em forma de frentes de ondas, com formas e velocidade de propagação características, conhecidas na literatura como *roll waves* ou “ondas de rolo”. Apesar de surgirem mais frequentemente em canais artificiais (Figura 2), não é raro encontrá-las em ambientes naturais, tais como em rios, vertedouros e barragens, deslizamentos de encostas, corridas de lama e detritos (*mudflows*, *debris flow*), avalanchas, etc.

Embora não exista no Brasil registro da presença do fenômeno *roll waves*, comprovado por meio de medições em encostas ou talvegues naturais, em outros países, como Nova Zelândia, China, Suíça e Itália foram confirmados o surgimento de frentes e trens de ondas desse tipo em escoamentos de detritos e/ou lamosos (FERREIRA, 2013). Vários registros em bacias de drenagem, como em Acquabona, na Itália, Barcelonnette, nos Alpes Franceses (França/Itália), etc., têm oferecido possibilidade de exploração de

Figura 2 – Exemplos de aparecimento de *roll waves* em canais artificiais. (a) *Roll waves* em escoamentos lamosos, canal na França; (b) *Roll waves* em água, no canal de Merligen, Suíça; (c) Instabilidades de superfície livre em fluido não-Newtoniano; (d) *Roll waves* em gel de carbopol em rampa experimental.

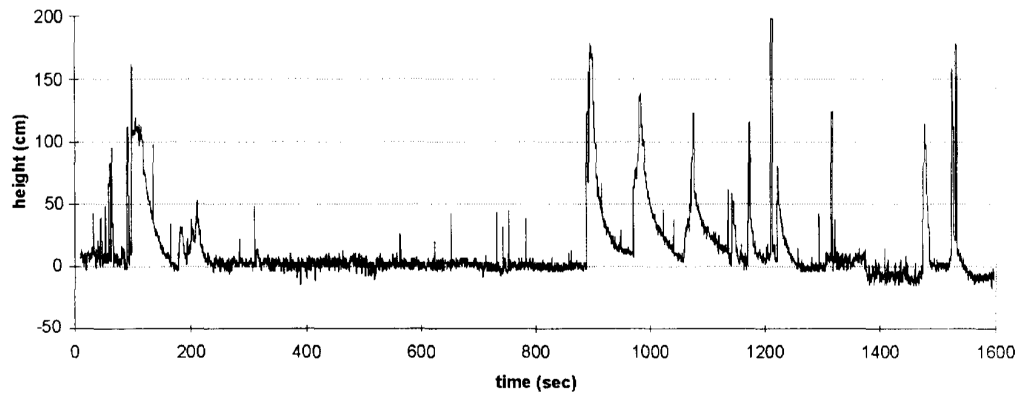


Fonte: (a) Acervo Digital - Grupo RMVP; (b) Cornish (1934); (c) Chanson et al. (2006), citado por FIOROT (2016); (d) Acervo Digital - Grupo RMVP.

dados do fenômeno. Em Acquabona, uma bacia de drenagem com canal de 1300 m dispõe de registros (profundidades, velocidades) de escoamentos com presença de frentes de ondas e transporte significativo de detritos, conforme Figura 3 (BERTI et al., 1999; BERTI et al., 2000).

A presença de *roll waves*, seja em canais naturais ou artificiais além de ocasionar transbordamentos e carreamento de detritos, o fenômeno pode causar sérios prejuízos econômicos e sociais, caso atinjam ambientes com presença de infraestrutura civil vulnerável e população. Por isso, conhecer as condições de geração destas ondas é de suma importância para definir os domínios de interesse quando da execução de um projeto de infraestrutura civil. Dentre as magnitudes desejadas, a tensão cisalhante exercida pelo escoamento no leito da calha (fundo do canal) representa um parâmetro importante de projeto, relacionado sobretudo à capacidade erosiva do escoamento em transportar sedimentos. No caso das *roll waves*, a sua influência no transporte de sedimentos ainda não é bem compreendida, porém estudos experimentais e numéricos vêm tentando descrever tal dinâ-

Figura 3 – Registro de monitoramento de profundidade de escoamento, em Acquabona, com a presença do fenômeno *roll wave* após tempestade de 17 de agosto de 1998.



Fonte: Berti et al. (2000).

mica (ARMANINI; RECCHIA, 2006; ZHAO et al., 2015; EDWARDS; GRAY, 2015). A conclusão lógica é que deve existir uma interação física entre *roll waves* e transporte de sedimentos, assunto que constitui, ainda, lacuna na literatura.

Em se tratando das propriedades cinemáticas e dinâmicas das *roll waves*, os modelos matemáticos e numéricos têm, majoritariamente, fornecido amplitude, comprimento e velocidade de propagação dessas ondas (MACIEL, 2001; ZANUTTIGH; LAMBERTI, 2007; MACIEL et al., 2013; DI CRISTO et al., 2015). No entanto, ainda existem poucos trabalhos na literatura que tratam da tensão de cisalhamento no fundo ao longo do comprimento da *roll wave* eventualmente presente nas corridas de lama, seja em regimes laminares ou turbulentos. Assim, o parâmetro tensão de cisalhamento no fundo reportada à tensão de cisalhamento do escoamento base (regime uniforme) passa a ser a chave de discussão acerca da maior ou menor capacidade erosiva do fenômeno.

Dentro deste contexto, o Grupo RMVP² tem buscado integrar diferentes formações, para agregar valores, no contexto de Desastres “Naturais” e corridas de lama, desenvolvendo trabalhos, de natureza teórica, física e numérica, na busca de identificar propriedades reométricas de materiais hiperconcentrados, como, por exemplo, mistura de água e argila; água, areia, argila (MACIEL et al., 2009), com aplicação em problemas tipo ruptura de barragem de rejeito (MINUSSI, 2007; LEITE, 2009) e, ainda, formação de instabilidades na superfície livre de escoamentos hiperconcentrados e lamas (FERREIRA, 2007; FERREIRA, 2013; CUNHA, 2013).

² Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplásticos – Grupo de pesquisa certificado no CNPq

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é estudar a tensão de cisalhamento no fundo, em presença de regimes pulsantes (*roll waves*), para escoamentos de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos³. Para isto foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Compreender, inicialmente, os mecanismos de geração das *roll waves* e suas propriedades (altura de onda, comprimento, celeridade), e a ação da tensão de cisalhamento exercida pelo escoamento pulsante no leito da calha ou fundo do canal tanto para escoamentos de fluidos Newtonianos quanto para fluidos não-Newtonianos;
- Reproduzir os procedimentos matemáticos apresentados por Dressler (1949) e obtenção de um sistema de equações (conservação da massa, quantidade de movimento) sob hipóteses de águas rasas, fluido invíscido, e efeito de parede do tipo Chézy-Manning-Strickler, cuja solução do sistema de equações resultou na equação das *roll waves*;
- Implementar o modelo matemático obtido em MATLAB[®];
- Realizar análises de comprimento de onda, amplitudes de ondas e critério de energia, conforme Dressler (1949).
- Comparar com resultados da literatura (BROCK, 1969; LIU et al., 2005), simulação com o *software* Fluent[®], e com resultados experimentais do Grupo RMVP;
- Determinar a taxa de tensão de cisalhamento no fundo com relação ao cisalhamento do escoamento base (sem *roll waves*), como função do número de Froude;
- Implementar o cálculo da tensão de cisalhamento no fundo no modelo numérico do Grupo RMVP;
- Realizar simulações numéricas a respeito do comportamento da tensão de cisalhamento de fundo em relação ao número de Froude e parâmetros reológicos.
- Obter a equação da *roll wave*, a partir das equações de Cauchy com o modelo reológico de Herschel-Bulkley com condição de fundo permeável;
- Implementar, numericamente, as equações da *roll wave* para fluidos do tipo Herschel-Bulkley com condição de fundo permeável;
- Determinar a influência do fator porosidade nas características das *roll waves* (amplitude, celeridade e comprimento de onda);
- Realizar análises da tensão de cisalhamento no fundo considerando o fundo permeável;

³ no Anexo A é apresentada terminologia básica e de forma simplificada os principais modelos reológicos

- Comparar os modelos (com e sem porosidade) com relação à tensão de cisalhamento do fundo.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por cinco Capítulos: Introdução; Estado da Arte; Modelos Matemáticos e Numéricos; Resultados e Discussões; Considerações Finais e Perspectivas Futuras. Ao final são apresentados as Referências Bibliográficas e Apêndices.

No Capítulo 1 (Introdução) foram apresentadas as motivações e justificativa da pesquisa, no contexto de Riscos e Catástrofes “Naturais” (corridas de lama), bem como os objetivos.

O Capítulo 2 trata do estado da arte e a contribuição deste trabalho para o entendimento de *roll waves* evoluindo em superfície livre de fluidos Newtonianos (água limpa) e não-Newtonianos (misturas hiperconcentradas, lamas), com foco nos efeitos destas ondas na tensão de cisalhamento no fundo de canais.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia desenvolvida, e este foi dividido em cinco partes: em um primeiro momento é apresentado a formulação “global” da fenomenologia *roll waves*, abordando as equações governantes, as hipóteses e as condições de contorno “globais”. Em seguida, são desenvolvidas as especificidades de cada modelo, qual seja, o escoamento de água em uma formulação da hidráulica clássica (fluido invíscido e lei de atrito de parede), escoamento em fluidos de Herschel-Bulkley, com fundo impermeável e, por fim, escoamento em fluidos de Herschel-Bulkley, com fundo permeável. Neste último modelo, além do desenvolvimento matemático, é realizada uma análise de estabilidade linear para determinação de um critério de geração de *roll wave*. Em seguida, é apresentado o modelo numérico implementado em MATLAB[®] para obtenção dos resultados, bem como a descrição da modelagem utilizada no Fluent[®].

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste Mestrado, quais sejam: análises comparativas entre modelos acerca da tensão de cisalhamento no fundo, comparação entre modelos numéricos e experimentais, bem como análise da influência do fator de porosidade nas propriedades de *roll waves*.

No Capítulo 5 são realizadas as considerações finais acerca dos modelos desenvolvidos, retomando os resultados mais relevantes. São tratadas, ainda, as perspectivas para trabalhos futuros, bem como a produção bibliográfica e produção técnica desenvolvida ao longo do Mestrado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste capítulo apresentam-se as considerações finais, as sugestões para trabalhos futuros, a produção bibliográfica e outros trabalhos de colaboração na temática dessa pesquisa.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação, estudaram-se os mecanismos de geração das *roll waves*, suas propriedades (altura de onda, comprimento, celeridade), e a ação da tensão de cisalhamento no fundo em escoamentos pulsantes (*roll waves*) com superfície livre. O trabalho foi dividido em duas vertentes: na primeira vertente (nomeada de **Modelo 1**), trabalhou-se com o modelo matemático clássico de *roll waves* proposto por Dressler (1949), isto é, *roll waves* desenvolvendo-se em água limpa, a partir das hipóteses da hidráulica clássica (fluido invíscido e lei de parede); na segunda vertente (nomeada de **Modelo 2**), estudou-se o fenômeno em situação de escoamento de fluido não-Newtoniano em regime laminar, em duas situações: no primeiro momento, considerou-se o fundo impermeável/não-poroso (nomeado de **M2FI**), conforme trabalhos anteriores do Grupo RMVP (MACIEL et al., 2013), e no segundo momento, a grande contribuição deste trabalho, a evolução de *roll waves* com condição de fundo permeável/poroso (nomeado de **M2FP**).

5.1.1 Modelos com fundo impermeável

Os modelos matemáticos desenvolvidos, de forma geral, se mostraram consistentes, apresentando resultados satisfatórios (promissores) quando comparados a ensaios experimentais e utilização de *softwares* comerciais. As comparações realizadas com trabalhos experimentais (BROCK, 1969; MACIEL et al., 2017) utilizando-se o **Modelo 1** e o **Modelo 2** com fundo impermeável (seções 3.2 e 3.3) apresentaram boa concordância em relação à amplitude e comprimento de onda. Quando analisada a tensão de cisalhamento no fundo (para o **Modelo 2**) em comparação com Fluent[®], observou-se que o comportamento e a variação de magnitudes são semelhantes, apesar dos valores absolutos apresentarem diferença da ordem de 12%.

Sob hipótese de modelos com fundo impermeável (**Modelo 1** e **M2FI**), concluiu-se que a tensão de cisalhamento no fundo em regimes pulsantes (com presença de *roll*

waves) em fluidos lamosos (regime laminar), podem aumentar em até 12%, enquanto, em escoamentos pulsantes em água (regime turbulento, considerando um coeficiente de atrito de parede), este incremento pode alcançar 27%.

Do **Modelo 1**, apesar do pico de tensão de cisalhamento poder alcançar até 27% do valor do escoamento base, verificou-se que os valores médios da tensão de cisalhamento no fundo não alteram significativamente os valores do número de Shields, e portanto, não alterariam o transporte de sedimentos, o que corrobora as observações realizadas por Fiorot (2016).

5.1.2 Modelo com fundo permeável/poroso

O desenvolvimento do **Modelo 2** com fundo poroso (**M2FP**) vem preencher uma lacuna na literatura no assunto de *roll waves* evoluindo em fluidos não-Newtonianos, e complementar os trabalhos desenvolvidos pelo Grupo RMVP, mais especificamente, os trabalhos realizados por Ferreira (2013) e Fiorot (2016).

No que diz respeito ao efeito do fundo poroso em escoamentos de fluidos não-Newtonianos, observou-se que este aumentou a possibilidade de geração de *roll waves*.

Apesar de terem sido realizadas simulações numéricas com fatores de porosidade (γ) até 0,8 (seção 4.3), este é um fator empírico, geralmente compreendido entre 0,001 e 0,4 como cita Pascal (2006), quando introduziu o efeito poroso em suas análises, porém restrita a fluido do tipo *power law* (sem efeito de tensão limite de escoamento). Desta forma, alguns resultados apresentados podem, de fato, não ser fisicamente representativos, entretanto, o objetivo da variação deste parâmetro para valores superiores ($\gamma \approx 0,80$) era analisar a sensibilidade do modelo matemático.

Assim, acerca das propriedades das *roll waves* (amplitude, celeridade e comprimento de onda), vale destacar:

- para $Fr > 1$, pôde-se observar que a presença do fator de porosidade (γ), em relação às características das *roll waves*, aumentou a tensão de cisalhamento no fundo do canal e as amplitudes de onda, quando $C = 0$, no entanto, as amplitudes tendem a aumentar quando $C \neq 0$. Em se tratando do comprimento e celeridade de onda, a presença do fator de porosidade diminuiu as mesmas;
- para $Fr < 1$, não houveram alterações significativas na amplitude e tensão de cisalhamento, quando da presença do fator de porosidade, entretanto pôde-se observar alteração no comprimento de onda e celeridade;
- seguindo o trabalho de Fiorot (2012), pôde-se verificar que a amplitude máxima pode ser escrita em função da lâmina baixa do escoamento, definindo-se um novo domínio para geração das *roll waves*;

- obteve-se, por meio de interpolação, uma equação para determinar o comprimento e celeridade de onda em função do número de Froude, para fundos permeáveis, o que viria a ser útil em projetos de infraestrutura em engenharia civil;
- a respeito da tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{f\max}$), verificou-se que, em situações “reais”, haveria um incremento de até 100% em presença de *roll waves*.

5.1.3 Vantagens e desvantagens dos modelos implementados

Vantagens:

- A principal vantagem dos modelos desenvolvidos é o tempo computacional reduzido, quando comparados com *softwares* comerciais que utilizam equações completas, necessitam de confecções de malhas (FERREIRA, 2013), e de computadores de alta performance.
- Possibilidade de se obter as principais propriedades/características dos escoamentos em presença de *roll waves*.

Desvantagens:

- Na modelagem numérica com efeito de permeabilidade no fundo (**M2FP**), foram observadas instabilidades ou possíveis erros numéricos, como mostrou as Figuras B.3–B.5, situadas no Apêndice B, o que requer uma atenção especial ao analisar resultados. Uma análise mais cuidadosa deve ser realizada quanto aos métodos numéricos utilizados e os intervalos apropriados para sua utilização.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas futuras, devem-se investir esforços em análises de estabilidade não-linear para novos critérios e domínios de geração de *roll waves* em escoamentos de Herschel-Bulkley com fundo poroso, como tem surgido na literatura (CAMPOMAGGIORE et al., 2016a; BARKER et al., 2017).

Sobre o modelo matemático/numérico desenvolvido para *roll waves* em fluidos não-Newtonianos em fundo permeável, deve-se verificar as possíveis instabilidades numéricas existentes nestes cálculos; confrontar resultados do modelo com *softwares* comerciais, como Fluent[®], ou OpenFOAM[®], com finalidade de validar o modelo proposto.

Sobre o transporte de sedimentos em presença de *roll waves*, deve-se acoplar, ao sistema de equações governantes, uma lei de transporte de sedimentos, como por exemplo, a Equação de Exner, que, de modo geral, relaciona a variação temporal da geometria do

fundo do canal com a porosidade e taxa de transporte de sedimentos (conservação da massa).

No que diz respeito a aplicações de engenharia, tem-se como perspectiva, a aplicação do modelo matemático para verificar a possibilidade de ocorrência de *roll waves*, a partir de dados reais, conforme trabalhos já realizados pelo Grupo RMVP (FIOROT et al., 2014; MACIEL et al., 2017; FIOROT et al., no prelo). Quanto à sua aplicação em âmbito nacional (no contexto de Desastres “Naturais”), como por exemplo, na Região Serrana do Rio de Janeiro (2011) e no evento de Mariana (2015), o modelo poderia ser utilizado para se inferir existência de domínio propício à geração de *roll waves* e determinação de suas características, como amplitudes máximas, velocidade de propagação e acréscimo da capacidade erosiva em fundo de canais.

Do ponto de vista teórico, vislumbra-se tratar o problema completo de *roll wave* (dinâmica, geometria, natureza viscosa do escoamento e reologia qualquer) no contexto de sistemas dinâmicos.

5.3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA E TÉCNICA

- Anais no XXII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos - 2016, Porto Velho - RO;
- Anais no XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - 2017, Florianópolis - SC;
- Artigo aceito aguardando publicação na Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental - 2018;
- Artigo aceito em Congresso Internacional: *River Flow 2018 - Ninth International Conference on Fluvial Hydraulics* - Lyon/França (de 5 a 8 de setembro de 2018);
- Produção de um vídeo institucional de divulgação das pesquisas do Grupo RMVP, na temática de Desastres “Naturais” abordando o mega-desastre de Mariana/MG (2015).

REFERÊNCIAS

- ANCEY, C. Plasticity and geophysical flows: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Amsterdam, v. 142, n. 1-3, p. 4–35, 2007.
- ARMANINI, A.; RECCHIA, N. Experimental analysis of roll waves in overconcentrated flow. In: INTERPRAEVENT. *Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides*. Niigata: Universal Academy Press, 2006.
- BALMFORTH, N. J.; MANDRE, C. Dynamics of roll waves. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 514, p. 1–33, 2004.
- BARKER, B. Numerical proof of stability of roll waves in the small-amplitude limit for inclined thin film flow. *Journal of Differential Equations*, Amsterdam, v. 257, n. 8, p. 2950–2983, 2014.
- BARKER, B.; JOHNSON, M. A.; NOBLE, P.; RODRIGUES, L. M.; ZUMBRUN, K. Stability of viscous st. venant roll waves: from onset to infinite froude number limit. *Journal of Nonlinear Science*, New York, v. 27, n. 1, p. 285–342, 2017.
- BEAVERS, G. S.; JOSEPH, D. D. Boundary conditions at a naturally permeable wall. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 30, n. 1, p. 197–207, 1967.
- BERTI, M.; GENEVOIS, R.; LAHUSEN, R.; SIMONI, A.; TECCA, P. R. Debris flow monitoring in the acquabona watershed on the dolomites (italian alps). *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, Amsterdam, v. 25, n. 9, p. 707–715, 2000.
- BERTI, M.; GENEVOIS, R.; SIMONI, A.; TECCA, P. R. Field observations of a debris flow event in the dolomites. *Geomorphology*, Amsterdam, v. 29, n. 3-4, p. 265–274, 1999.
- BROCK, R. R. *Development of roll waves in open channels*. 1969. 243 f. Tese (PhD, Division of Engineering and Applied Science) — California Institute of Technology, Pasadena, California, 1969.
- CAMPOMAGGIORE, F.; DI CRISTO, C.; IERVOLINO, M.; VACCA, A. Development of roll-waves in power-law fluids with non-uniform initial conditions. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, v. 54, n. 3, p. 289–306, 2016.
- CAMPOMAGGIORE, F.; DI CRISTO, C.; IERVOLINO, M.; VACCA, A. Inlet effects on roll-wave development in shallow turbulent open-channel flows. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, Warsaw, v. 64, n. 1, p. 45–55, 2016.
- CAO, Z.; HU, P.; HU, K.; PENDER, G.; LIU, Q. Modelling roll waves with shallow water equations and turbulent closure. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, v. 53, n. 2, p. 161–177, 2015.

CARMO, R. do; VALENCIO, N. *Segurança humana no contexto dos desastres*. São Carlos: RiMa, 2014. 210 p.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS - CRED. *EM-DAT*: The international emergency disasters database. Brussels: CRED, 2018. Disponível em: <<http://www.emdat.be>>. Acesso em: 25 ago 2018.

CHANSON, H.; JARNY, S.; COUSSOT, P. Dam break wave of thixotropic fluid. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 132, n. 3, p. 280–293, 2006.

CHEN, Y.-L.; ZHU, K.-Q. Couette–poiseuille flow of bingham fluids between two porous parallel plates with slip conditions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Amsterdam, v. 153, n. 1, p. 1–11, 2008.

CHEVALIER, T.; CHEVALIER, C.; CLAIN, X.; DUPLA, J. C.; CANOU, J.; RODTS, S.; COUSSOT, P. Darcy’s law for yield stress fluid flowing through a porous medium. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Amsterdam, v. 195, p. 57–66, 2013.

COLOMBINI, M.; STOCCHINO, A. Coupling or decoupling bed and flow dynamics: Fast and slow sediment waves at high froude numbers. *Physics of Fluids*, New York, v. 17, n. 3, p. 036602–1–9, 2005.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. *Projeto GIDES – JICA*: projeto de fortalecimento da estratégia nacional de gestão integrada de riscos em desastres naturais. [S.l.]: CPRM, 2018. Disponível em: <<https://goo.gl/CqdzQ2>>. Acesso em: 25 jun 2018.

CORNISH, V. On tidal bores which assume the form of a group of short waves. *Geophysical Journal International*, Oxford, v. 3, n. 5, p. 183–190, 1934. Suplemento.

COUSSOT, P. Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, v. 32, n. 4, 1994.

CUNHA, E. F. da. *Implementação de aparato experimental para medição de instabilidades tipo roll waves em fluidos não-newtonianos*. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

DI CRISTO, C.; IERVOLINO, M.; VACCA, A. On the applicability of minimum channel length criterion for roll-waves in mud-flows. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, Warsaw, v. 61, n. 4, p. 286–292, 2013.

DI CRISTO, C.; IERVOLINO, M.; VACCA, A. On the stability of gradually varying mud-flows in open channels. *Meccanica*, v. 50, n. 4, p. 963–979, 2015.

DRESSLER, R. F. Mathematical solution of the problem of roll-waves in inclined open channels. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, New York, v. 2, n. 2-3, p. 149–194, 1949.

EDWARDS, A. N.; GRAY, J. M. N. T. Erosion–deposition waves in shallow granular free-surface flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 762, p. 35–67, 2015.

- FERREIRA, F. de O. *Abordagem matemática de roll waves em escoamentos hiperconcentrados com superfície livre*. 2007. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2007.
- FERREIRA, F. de O. *Estabilidade e controle dinâmico de roll waves*. 2013. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2013.
- FERREIRA, F. de O.; MACIEL, G. de F.; FIOROT, G. H.; CUNHA, E. F. da. Numerical analysis of roll waves generation on non-newtonian fluids flowing down an inclined plane. *Advanced Materials Research*, Switzerland, v. 1006-1007, p. 160–167, 2014.
- FIOROT, G. H. *Mitigação de riscos e catástrofes naturais: análise numérico-experimental de roll waves evoluindo em canais inclinados*. 2012. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2012.
- FIOROT, G. H. *On unsteady open-channel flows: a contribution to nonstationary sediment transport in runoff flows and to unstable non-newtonian mudflow studies*. 2016. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2016.
- FIOROT, G. H.; FERREIRA, F. de O.; DUPONT, P.; MACIEL, G. de F. Roll waves study on acquabona watershed: an application of mathematical modelling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ANALYSIS AND MANAGEMENT OF CHANGING RISK FOR NATURAL HAZARDS, 2014, Padua. *Conference...* Padua: [s.n.], 2014. AP7, p. 1–10.
- FIOROT, G. H.; FERREIRA, F. de O.; DUPONT, P.; MACIEL, G. de F. Roll waves mathematical model as a tool in risk assessment: case study of acquabona catchment. *Journal Hydraulics Engeenering*. No prelo.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgar Blücher, 1984. 142 p.
- GUIDUGLI, R. B.; CANDIDO, M.; CAMARGO, R. S.; SIMONSEN, S.; PERIOLI, C. Manejo de corpos em desastres de massa. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE DESASTRES NATURAIS, 1., 2012, Rio Claro. *Anais...* Rio Claro: [s.n.], 2012. 1CD-ROM.
- HUANG, X.; GARCÍA, M. H. A herschel–bulkley model for mud flow down a slope. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 374, p. 305–333, 1998.
- HUANG, Z.; LEE, J.-J. Modeling the spatial evolution of roll waves with diffusive saint venant equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 141, n. 2, p. 06014022–, 2015.
- HWANG, S. H.; CHANG, H. C. Turbulent and inertial roll waves in inclined film flow. *Physics of Fluids*, New York, v. 30, n. 5, 1987.
- ISHIHARA, T.; IWAGAKI, Y.; IWASA, Y. Theory of the roll-wave trains in laminar water flow on a steep slope surface. *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*, v. 1954, n. 19, p. 46–57, 1954.

- JEFFREYS, H. The flow of water in an inclined channel of rectangular section. *Philosophical Magazine Series 5*, London, v. 49, n. 293, p. 793–807, 1925.
- JOHNSON, M. A.; NOBLE, P.; RODRIGUES, L. M.; YANG, Z.; ZUMBRUN, K. Spectral stability of inviscid roll waves. [S.l.]:ArXiv e-prints, 2018. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1803.03484>>. Acesso em: 29 ago 2018.
- KRANENBURG, C. On the evolution of roll waves. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 245, n. -1, p. 249–261, 1992.
- LEFEBVRE, G.; MERCERON, A.; JOP, P. Interfacial instability during granular erosion. *Physical Review Letters*, New York, v. 116, n. 6, p. 068002–, 2016.
- LEITE, L. de O. B. *Determinação física e numérica de corridas de lama resultantes de ruptura de barreira retendo material viscoplástico*. 2009. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2009.
- LIU, J.; GOLLUB, J. P. Solitary wave dynamics of film flows. *Physics of Fluids*, New York, v. 6, n. 5, p. 1702–1712, 1994.
- LIU, K.; MEI, C. C. Roll waves on a layer of a muddy fluid flowing down a gentle slope - a bingham model. *Physics of Fluids*, New York, v. 6, n. 8, p. 2577–2590, 1994.
- LIU, Q. Q.; CHEN, L.; LI, J. C.; SINGH, V. P. Roll waves in overland flow. *Journal of Hydrologic Engineering*, Reston, v. 10, n. 2, p. 110–117, 2005.
- LUMEN LEARNING. *Geology, hydrology: porosity and permeability*. Lumen Learning: online, 2018. Module 11. Disponível em: <<https://courses.lumenlearning.com/geo/chapter/reading-porosity-and-permeability/>>. Acesso em: 02 jul 2018.
- MACIEL, G. de F. *Roll waves evoluindo em canais de forte declividade: Uma abordagem matemática com aproximação numérica*. 2001. 184 f. Tese (Livre Docência em Roll Waves) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2001.
- MACIEL, G. de F.; FERREIRA, F. de O.; FIOROT, G. H. Control of instabilities in non-newtonian free surface fluid flows. *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Rio de Janeiro, v. 35, n. 3, p. 217–229, 2013.
- MACIEL, G. de F.; SANTOS, H. K. dos; FERREIRA, F. de O. Rheological analysis of water clay compositions in order to investigate mudflows developing in canals. *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 64–74, 2009.
- MACIEL, G. F.; FERREIRA, F. O.; CUNHA, E. F.; FIOROT, G. H. Experimental apparatus for roll-wave measurements and comparison with a 1d mathematical model. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 143, n. 11, p. 04017046:1–10, 2017.
- MINUSSI, R. B. *Rompimento de barreiras: análise experimental e numérica na previsão de velocidade de propagação de frentes de material hiperconcentrado*. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2007.

- MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. *Report on the immediate causes of the failure of the fundão dam*. [S.l.: s.n.], 2016.
- MOTTA, F. *Catástrofe no Rio de Janeiro*. São Paulo: Jornal O Estadão, 2011. Foto. Disponível em: <<http://blogs.estadao.com.br/olhar-sobre-o-mundo/catastrofe-no-rio-de-janeiro/>>. Acesso em: 24 abr 2015.
- NEEDHAM, D. J.; MERKIN, J. H. On roll waves down an open inclined channel. *Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences*, London, v. 394, n. 1807, p. 259–278, 1984.
- NG, C. O.; MEI, C. C. Roll waves on a layer of fluid mud modelled as a power law fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 263, n. -1, p. 151–184, 1994.
- PAPHITIS, D. Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves. *Coastal Engineering*, Amsterdam, v. 43, n. 3-4, p. 227–245, 2001.
- PASCAL, J. P. Instability of power-law fluid flow down a porous incline. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Amsterdam, v. 133, n. 2-3, p. 109–120, 2006.
- PIAU, J. M. Flow of a yield stress fluid in a long domain, application to flow on a inclined plane. *J. Rheology*, New York, v. 40, p. 771–723, 1996.
- PIVETTA, M. Um brasil mais vulnerável no século xxi. *Pesquisa FAPESP*, São Paulo, n. 249, p. 16–23, 2016.
- PONCE, V. M.; PORRAS, P. J. Effect of cross-sectional shape on free-surface instability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROLOGY AND WATER RESOURCES, 1993, New Delhi. *Proceedings...* Dordrecht: Springer Netherlands, 1996. p. 343–354. ISBN 978-94-011-0389-3.
- POTT, C. M.; ESTRELA, C. C. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 31, p. 271–283, 2017. ISSN 0103-4014.
- RAO, A. R.; MISHRA, M. Peristaltic transport of a power-law fluid in a porous tube. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Amsterdam, v. 121, n. 2-3, p. 163–174, 2004.
- REBELLO, E.; CARVALHO, B. E. F. C. de; COSTA, J.; FREITAS, M.; CAVALCANTE, A. O. Condições meteorológicas das chuvas fortes que atingiram a região serrana do rio de janeiro no dia 12.01.2011. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE DESASTRES NATURAIS, 1., 2012, Rio Claro. *Anais...* Rio Claro: [s.n.], 2012. 1CD-ROM.
- RICHARD, G. L.; GAVRILYUK, S. L. A new model of roll waves: comparison with brock's experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 698, p. 374–405, 2012.
- RODRIGUES, L. M.; ZUMBRUN, K. Periodic-coefficient damping estimates, and stability of large-amplitude roll waves in inclined thin film flow. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, Philadelphia, v. 48, n. 1, p. 268–280, 2016.
- SHIELDS, A. *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*. Pasadena: California Institute of Technology, 1936.

YANG, M.; GONG, J.; ZHANG, K.; FAN, D.; ZHAO, Y.; WANG, H. Establishment and experiment of ultrasonic measuring system for characteristic parameters of roll waves on slope surface. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, Beijing, v. 33, n. 3, p. 134–139, 2017. ISSN 1002-6819.

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

ZHAO, C.; GAO, J.; ZHANG, M.; ZHANG, T.; WANG, F. Response of roll wave to suspended load and hydraulics of overland flow on steep slope. *Catena*, Amsterdam, v. 133, p. 394–402, 2015.