

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA A DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS DE UM CONDUTO LIVRE

Irene Gurgel Mendonça¹; Edwin Andres Mancilla Rico²; João Pedro Lellis Guerra³; Jonathas Braga Baker⁴, Ana Letícia Pilz de Castro⁵

RESUMO – Esse trabalho teve como foco determinar por meio de modelagem computacional parâmetros hidráulicos de um conduto livre e compara-los com os resultados experimentais disponíveis na literatura. A presente pesquisa utilizou o *software* Ansys e as ferramentas presentes nele para realizar a simulação. Para a modelagem do canal foi utilizada a plataforma SpaceClaim do Ansys e para a realização da malha a plataforma Mesh do Ansys, com elementos hexaédricos. As condições de contorno, especificações dos materiais, entre outras informações foram inseridas na plataforma Fluent do Ansys, o qual foi escolhido para o processamento computacional da pesquisa. Com as simulações realizadas observou-se que nas paredes e na parte inferior do canal, a velocidade foi quase nula e que com o aumento da distância da entrada, ocorre o aumento da velocidade do escoamento. Além disso, verificou-se que quanto maior a declividade do canal maior Número de Reynolds, o Coeficiente de Manning e, ainda, o fator de atrito. Foram encontradas algumas interferências na pesquisa e os resultados quantitativos não se aproximaram dos valores reais. Por fim, foram pontuados os motivos que possam ter causado interferências nos resultados do canal.

ABSTRACT– This work is devoted to determining hydraulic parameters through computational modeling and comparing them with experimental results in the literature. The present research used the Ansys software and its tools to perform the simulation. We used the Ansys SpaceClaim platform to model the channel and the Ansys Mesh platform for meshing with hexahedral elements. We inserted the boundary conditions, material specifications, and other constraints at the Ansys Fluent, which is the platform chosen for the computational processing in this work. After finishing the simulations of the channels, we observed that at the walls and the bottom part of them, the velocity was almost zero. As the entrance distance increases, the flow velocity also increases. Also, it was possible to check that the greater the channel's declivity, the greater the number of Reynolds, Manning Coefficient, and the Friction Factor. We found some issues during the development of this work that we account for the quantitative results that have not approximated the real ones. Finally, we point out the reasons that may have caused interference in the channel.

Palavras-Chave – Simulação computacional; conduto livre; simulação de conduto livre.

1) Discente, Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, Brasil, irene.mendonca@aluno.ufop.edu.br

2) Docente, Universidad Libre de Colombia- Seccional Pereira, edwin.mancillar@unilibre.edu.com

3) Engenheiro Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, Brasil, joao.guerra@aluno.ufop.edu.br

4) Discente, Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (ITV – UFOP), Ouro Preto – MG. jonathas.baker@aluno.ufop.edu.br

5) Docente, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil, anacastro@ufop.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A hidráulica em condutos livres, na formação de engenheiros civis, ambientais, entre outros, é caracterizada como uma das matérias essenciais que abrange os escoamentos sujeitos à pressão atmosférica. Essa disciplina engloba o dimensionamento de sistema de esgotamento sanitário, canais e galerias de águas pluviais, o estudo dos fenômenos de ressalto hidráulico e remanso e, além disso, a verificação da capacidade hidráulica de condutos livres que podem possuir diversos tipos de seções transversais. Para simplificar os cálculos matemáticos e caracterizar o escoamento permanente, o qual representa o equilíbrio entre as forças de gravidade e resistência, adota-se a constância no tempo e espaço dos valores da altura da lâmina de água (Chadwick e Morfett, 1998).

O valor numérico da rugosidade em canais livres, diferente dos condutos forçados, é de difícil especificação em revestimentos sem controle de qualidade industrial ou, mais complicado ainda, em canais naturais (Porto, 2006). O coeficiente de rugosidade de Manning varia de acordo com o nível d'água na seção, em geral, quanto menor a profundidade, maiores as irregularidades do fundo do canal, logo, maior o seu valor (Chow, 1959). O número de Froude é o parâmetro que separa os tipos de regime de escoamento de acordo com sua relação com o nível crítico da água no canal, esse número representa a razão entre a velocidade característica e a velocidade de onda gravitacional. Já o número de Reynolds é que o permite avaliar se o escoamento flui de forma laminar ou turbulenta, ou seja, podendo indicar o tipo de escoamento (a estabilidade do fluxo) (Rico, 2018).

De acordo com Gavira (2003), a simulação computacional é uma ferramenta que pode ser usada para aquisição, organização e construção da visão do sistema como um todo. Essa ferramenta colabora na educação e no treinamento dos indivíduos e, dessa forma, sua adaptação às bruscas mudanças de nossa sociedade. Através dela, administradores e engenheiros podem adquirir capacidade de identificar, formular e solucionar questões conectadas às atividades de projeto, operação e gerenciamento do trabalho e de sistemas de produção de bens e/ou serviços. Para que a simulação seja útil, alguns cuidados devem ser tomados, como, por exemplo, os passos do estudo devem ser seguidos cuidadosamente, os dados analisados sistematicamente e a implementação deve ser perfeitamente realizada. Caso os cuidados foram negligenciados, os erros podem causar danos e prejuízos aos sistemas reais.

Diante do exposto o objetivo geral deste trabalho é determinar através de modelagem computacional os parâmetros hidráulicos de um conduto livre e compará-los com os resultados experimentais obtidos por Rico (2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

Desenvolvimento do canal

O canal a ser simulado possui seção retangular com 0,40 m de largura, 0,5 m de profundidade e comprimento de 6 m, o revestimento é de vidro laminado de 8 mm e possui declividade variável.

O *software* utilizado foi o Ansys, o qual é utilizado para simulações computacionais de engenharia, e o molde do canal foi realizado através da plataforma SpaceClaim do programa, que torna possível a modelagem do canal em terceira dimensão. Primeiramente, foi desenhada, no *software*, a seção transversal através do comando linha (L). Nessa etapa retirou-se a espessura das placas de cerâmica utilizadas para validação do modelo computacional. Em seguida, utilizando o comando puxar (P) para o comprimento de 6 m do canal.

Após analisar os resultados do trabalho de Rico (2018), notou-se que a altura da lâmina d'água não ultrapassa 16 cm. Por essa razão, foi utilizada a altura de 16 cm para um melhor tempo de processamento computacional. A Figura 1 ilustra o canal utilizado.

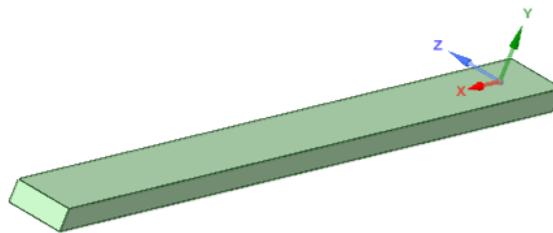


Figura 1 – Representação do canal com 16 cm de altura.

Malha

Para a realização da pesquisa foi utilizado o *software* com licença estudantil, a qual não permite malhas com mais de 512000 elementos. A malha foi realizada através da plataforma Mesh do Ansys, que realiza a divisão do corpo sólido em malhas e nós. Os elementos foram hexaédricos, visto que se trata de um canal bastante uniforme. Então, foram 114400 elementos e 129924 nós.

Condições de contorno

As condições de contorno, especificações dos materiais, velocidade do escoamento, entre outros foram inseridos na plataforma Fluent. Definiu-se o *inlet*, o *outlet* e a *atmosphere*, que são a entrada, saída e superfície livre do canal, respectivamente. Na Tabela 1, estão as condições de contorno, ou seja, os parâmetros inseridos no *inlet* para cada um dos cenários. Esses foram definidos baseados em diferentes declividades, as quais foram medidas em porcentagem no modelo experimental e em graus, equivalentes, na simulação, e as vazões escolhidas através do trabalho de Rico (2018). O diâmetro hidráulico foi calculado de acordo com os resultados da primeira medição do estudo do autor.

Tabela 1 – Condições de contorno.

	Vazão mássica (kg/s)								Declividade
	3,81	6,15	7,98	9,64	11,91	13,74	15,74	17,56	
Diâmetro Hidráulico (m)	0,0464	0,0591	0,0664	0,0714	0,0796	0,087	0,0999	0,1128	2%
	0,0870	0,1285	0,1474	0,1734	0,1940	0,2111	0,2306	0,2440	0,30%
	0,1224	0,1565	0,1774	0,2032	0,2177	0,2367	0,2545	0,2668	0,10%
	0,1340	0,1710	0,1925	0,2132	0,2312	0,2496	0,2648	0,2775	0%

Através da calibração do modelo, o coeficiente de tensão superficial da água utilizado foi 0,072n/m (água a 20°C), a rugosidade utilizada foi n=0,013 e a intensidade da turbulência 5%.

Pós-processamento

Para adquirir os resultados quantitativos e qualitativos, foram retiradas seções do canal, nas marcas de 1,65m, 2,65m, 3,65m e 4,65m do canal, as mesmas distancias utilizadas nos ensaios experimentais descritos por Rico (2018). Assim, nessas seções foram obtidas as velocidades e vazões mássicas.

As alturas das lâminas d'água (h) não foram retiradas 'prontas' das funções presentes no Ansys, logo, foi necessária a utilização da seguinte equação:

$$Q = V * A \quad (1)$$

Considerando área:

$$A = b * h \quad (2)$$

Substituindo a Equação 2 na Equação 1, tem-se:

$$Q = V * b * h \quad (3)$$

Assim, isolando o h (altura da lâmina d'água), tem-se:

$$h = \frac{Q}{V * b} \quad (4)$$

Onde: Q é a vazão; V é a velocidade; A é a área; b é a base e; h é a altura de lâmina d'água.

Então, para os cálculos dos hs utilizou-se a Equação 4, visto que a largura da base é fixa e a velocidade foi retirada das funções do *software*, assim como a vazão.

As equações dos parâmetros calculados estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Equações dos parâmetros calculados.

Parâmetros			
Coefficiente de Manning	Número de Froude	Número de Reynolds	Fator de Atrito 'f'
$n = \frac{A^{5/3} P^{-2/3} I^{1/2}}{Q}$	$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * H_m}}$	$Re = \frac{V * R_h}{\nu}$	$f^{1/2} = \frac{\sqrt{8g * n}}{R_h^{1/6}}$

Sendo: A : área molhada; P : perímetro molhado; H_m : altura da lâmina d'água; V : velocidade média do fluido; R_h : raio hidráulico; ν : viscosidade cinemática; g : aceleração da gravidade.

A rugosidade relativa foi obtida através do diagrama de Moody (1944).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse item estão apresentados os resultados encontrados na pesquisa, desde os resultados quantitativos quanto aos qualitativos da simulação computacional.

Análise qualitativa

Na Figura 2 está ilustrado o comportamento da água em relação ao seu volume.

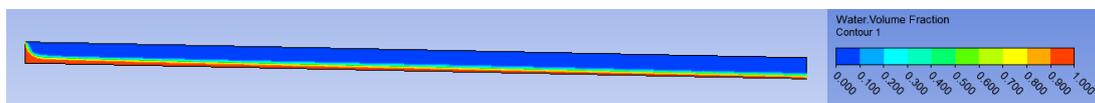


Figura 2 – Análise qualitativa - Canal liso e volume da água.

Então, foi possível observar o nível da água, entre 2,86cm e 3,66cm, desse experimento que é no canal liso com 1,15° de declividade e vazão igual a 0,018m³/s.

Já na Figura 3 é possível visualizar os vetores com a direção do escoamento.

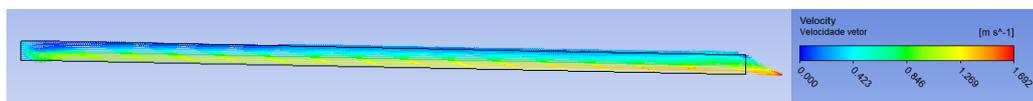


Figura 3 – Análise qualitativa – Vetores de velocidade.

Assim, observou-se o comportamento do escoamento da água, sua direção e o aumento da velocidade na saída do canal, em comparação com a entrada.

As Figuras 4 (a), (b), (c) e (d) ilustram o resultado do contorno das velocidades (canal liso com 2% de declividade e vazão igual a 0,018 m³/s) nas diferentes seções analisadas.

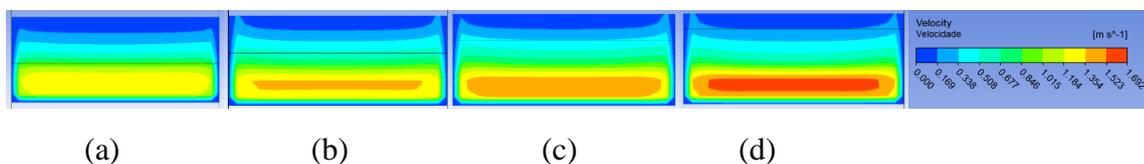


Figura 4 – Análise qualitativa - Contorno das seções em: (a)1,65 m; (b)2,65 m; (c)3,65 m; e (d)4,65 m.

Por meio das figuras observar-se que nas paredes a velocidade é quase nula, assim como na prática, e que a velocidade maior encontra-se no centro do escoamento. Além disso, notou-se que, com o aumento da distância da entrada, ocorreu o aumento da velocidade, o que se espera em um escoamento com declividade, assim como no estudo do Rico (2018).

Análise quantitativa

Nesse item foi realizada a análise quantitativa das simulações realizadas pelas quatro declividades: 2% (alta), 0,30% e 0,10% (média) e sem declividade.

Considerando os pontos em que as seções foram retiradas (1,65 m, 2,65 m, 3,65 m e 4,65m) fez-se uma média das alturas de lâmina d'água encontradas para o cálculo dos parâmetros hidráulicos. Na Tabela 3 encontram-se as alturas de lâmina d'água calculadas através dos resultados encontrados.

Tabela 3 - Alturas de lâmina d'água encontradas.

Pontos das seções medidos em relação à entrada do canal	Vazão (m ³ /s)								Declividade
	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	
1,65	3,115	3,102	3,662	4,447	4,218	5,285	6,042	6,386	2%
2,65	1,620	4,070	3,400	4,030	5,490	5,450	5,610	5,990	
3,65	1,897	3,609	3,914	3,756	4,914	5,04	5,306	5,735	
4,65	2,013	3,206	3,798	4,261	3,892	4,4	4,38	5,589	
1,65	3,451	4,083	4,837	5,195	6,486	5,727	6,476	7,908	0,30%
2,65	1,810	5,410	5,210	5,780	6,010	6,370	7,010	7,610	
3,65	1,341	5,178	4,729	5,567	5,808	5,576	6,311	6,937	
4,65	1,018	4,959	4,143	5,24	5,015	4,825	4,819	6,324	
1,65	3,605	5,237	4,693	5,242	6,683	5,894	6,695	7,787	0,10%
2,65	1,960	5,200	5,670	5,930	6,260	6,590	7,250	7,140	
3,65	1,281	4,949	5,411	6,083	6,757	7,266	6,639	6,712	
4,65	1,086	4,667	5,086	5,817	6,118	6,891	5,292	5,336	
1,65	4,951	5,542	4,54	5,418	6,292	6,011	6,902	8,026	0%
2,65	3,950	4,830	5,460	6,280	6,220	7,140	7,470	7,180	
3,65	3,203	4,18	4,671	6,311	6,832	6,673	6,893	6,958	
4,65	2,881	3,393	3,884	5,891	5,993	5,416	5,081	5,722	

Através da análise da tabela foi possível perceber que a altura da lâmina d'água, no geral, diminui ao decorrer do escoamento no canal, quanto mais perto da entrada, maior é sua altura. Realizando a comparação dos resultados da simulação computacional com os obtidos por Rico (2018) para as diferentes declividades, observa-se uma discrepância entre os valores encontrados experimentalmente e computacionalmente (Tabela 4). Essa diferença pode ter ocorrido, pois adotou-se a declividade equivalente, das porcentagens em graus nas simulações computacionais. Apesar de os valores encontrados não serem satisfatórios observou-se, na análise qualitativa uma concordância com os ensaios de laboratório.

Tabela 4 - Comparação das alturas de lâmina d'água.

Declividade	Vazão (m ³ /s)	Altura da lâmina d'água experimental (cm)				Altura da lâmina d'água computacional (cm)			
		1,65	2,65	3,65	4,65	1,65	2,65	3,65	4,65
2%	0,004	1,23	1,63	1,55	1,25	3,12	1,62	1,55	2,01
	0,006	1,60	1,90	1,90	1,73	3,10	4,07	1,90	3,21
	0,008	1,82	2,13	2,43	1,93	3,66	3,40	2,43	3,80
	0,010	1,97	2,30	2,57	2,20	4,45	4,03	2,57	4,26
	0,012	2,22	2,62	2,80	2,55	4,22	5,49	2,80	3,89
	0,014	2,45	2,88	2,90	2,75	5,28	5,45	2,90	4,40
	0,016	2,87	3,07	3,27	3,05	6,04	5,61	3,27	4,38
	0,018	3,30	3,33	3,53	3,45	6,39	5,99	3,53	5,59
0,30%	0,004	2,45	2,90	3,37	3,47	3,45	1,81	3,37	1,02
	0,006	3,85	4,15	4,87	5,13	4,08	5,41	4,87	4,96
	0,008	4,55	4,98	5,35	5,80	4,84	5,21	5,35	4,14
	0,010	5,58	5,83	6,30	6,67	5,20	5,78	6,30	5,24
	0,012	6,47	7,00	7,37	7,67	6,49	6,01	7,37	5,02
	0,014	7,25	7,53	8,37	8,52	5,73	6,37	8,37	4,83
	0,016	8,20	8,62	8,90	9,35	6,48	7,01	8,90	4,82
	0,018	8,90	9,42	9,70	9,93	7,91	7,61	9,70	6,32
0,10%	0,004	3,63	3,82	3,80	3,62	3,60	1,96	3,80	1,09
	0,006	4,90	5,20	5,32	5,08	5,24	5,20	5,32	4,67
	0,008	5,75	6,07	6,22	6,22	4,69	5,67	6,22	5,09
	0,010	6,88	7,05	7,05	7,02	5,24	5,93	7,05	5,82
	0,012	7,57	8,20	7,93	8,05	6,68	6,26	7,93	6,12
	0,014	8,52	9,00	8,87	8,60	5,89	6,59	8,87	6,89
	0,016	9,47	9,58	9,67	9,38	6,70	7,25	9,67	5,29
	0,018	10,17	10,50	10,48	10,37	7,79	7,14	10,48	5,34
0%	0,004	4,05	4,35	4,03	4,10	4,95	3,95	4,03	2,88
	0,006	5,48	5,63	5,45	5,50	5,54	4,83	5,45	3,39
	0,008	6,40	6,45	6,40	6,30	4,54	5,46	6,40	3,88
	0,010	7,35	7,40	7,27	7,13	5,42	6,28	7,27	5,89
	0,012	8,23	8,48	8,45	8,23	6,29	6,22	8,45	5,99
	0,014	9,20	9,20	9,17	9,12	6,01	7,14	9,17	5,42
	0,016	10,05	10,13	9,93	9,80	6,90	7,47	9,93	5,08
	0,018	10,80	10,70	10,70	10,45	8,03	7,18	10,70	5,72

Cálculo dos parâmetros hidráulicos

Primeiramente, foi realizado o cálculo de todos os parâmetros, com exceção da rugosidade relativa, visto que ela depende do fator de atrito (quanto maior a rugosidade relativa, maior o 'f', como observado no gráfico de Moody), o qual foi utilizado para determinar qual a melhor seção a ser estudada, utilizando os resultados de todas as seções.

Através dos cálculos do fator de atrito ‘f’ foi possível perceber que a seção de 4,65 metros (distância da entrada do canal) foi a que melhor se aproximou da realidade, visto que todos os valores calculados encontram-se abaixo de 1, o que foi verificado na pesquisa de Rico (2018). Como se trata de uma superfície com uma baixa rugosidade, o fator de atrito, conseqüentemente deve ser baixo. Por essa razão, essa seção foi a escolhida para cálculo dos parâmetros hidráulicos, gráficos e tabelas apresentados a seguir.

Na Figura 5 observou-se o comportamento do coeficiente de Manning em relação à vazão.

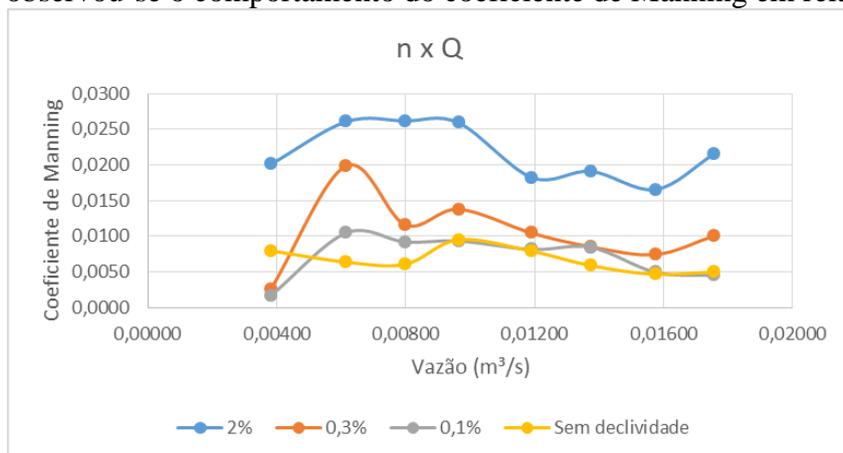


Figura 5 - Comparação de ‘n’ de Manning versus a vazão nas diferentes declividades simuladas.

Foi possível analisar que com o aumento da declividade, elevou-se o número de Manning.

Na Tabela 5 encontram-se o fator de atrito calculado para cada uma das seções, em todas as declividades simuladas.

Tabela 5 - Fatores de atrito calculados.

	Vazão (m³/s)								Declividade
	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	
Fator de Atrito	0,1204	0,1768	0,17	0,1613	0,0818	0,0869	0,0653	0,1038	2%
	0,0024	0,0911	0,0326	0,0432	0,025	0,0169	0,0128	0,0219	0,30%
	0,001	0,0256	0,0193	0,0193	0,0145	0,0151	0,0055	0,0046	0,10%
	0,017	0,0104	0,0091	0,02	0,0137	0,0078	0,005	0,0055	0%

Então, observou-se que o fator de atrito reduz à medida que se diminui a declividade. Assim, em casos de maiores declividades, mais elevados é o fator de atrito, o que resulta em uma maior perda de carga.

A Tabela 6 apresenta os valores de Número de Froude calculados, na qual foi verificado que o escoamento em todos os casos foi subcrítico.

Tabela 6 - Número de Froude calculado.

	Vazão (m ³ /s)								Declividade
	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	
Número de Froude	0,0888	0,0548	0,0475	0,0449	0,0643	0,0573	0,0638	0,0458	2%
	0,1976	0,0208	0,0366	0,0283	0,0358	0,0427	0,0498	0,0337	0,30%
	0,1704	0,0229	0,0249	0,0227	0,025	0,0229	0,0441	0,0457	0,10%
	0,0363	0,0399	0,0391	0,0219	0,0256	0,0348	0,0449	0,0397	0%

A Figura 6 apresenta a relação entre o número de Reynolds e o coeficiente de Manning.

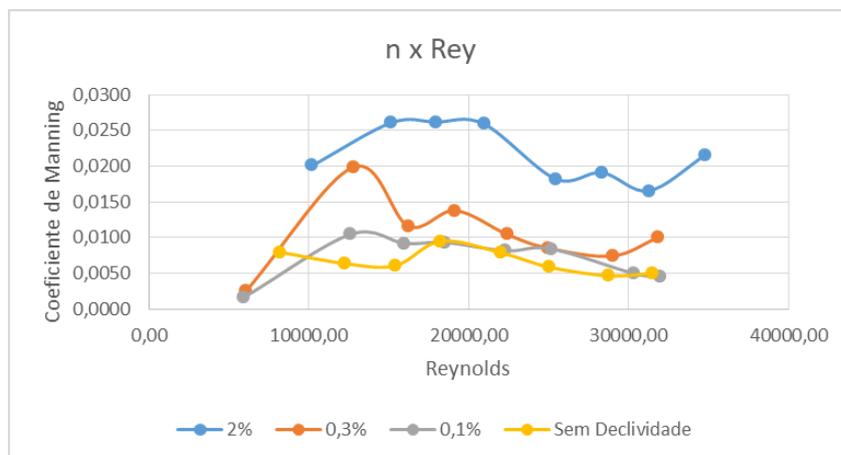


Figura 6 - Comparação de 'n' de Manning versus Número de Reynolds nas diferentes declividades simuladas.

O número de Reynolds permite avaliar o tipo do escoamento (a estabilidade do fluxo), indicando se flui de forma laminar ou turbulenta. Em declividades mais altas, encontrou-se um maior Número de Reynolds, assim como um maior Coeficiente de Manning. Já nas declividades médias e baixas, nas quais a inclinação varia pouco, os parâmetros foram mais parecidos. Por fim, o escoamento em todos os casos foi turbulento.

A Figura 7 ilustra a comparação entre o Número de Reynolds e o Fator de Atrito.

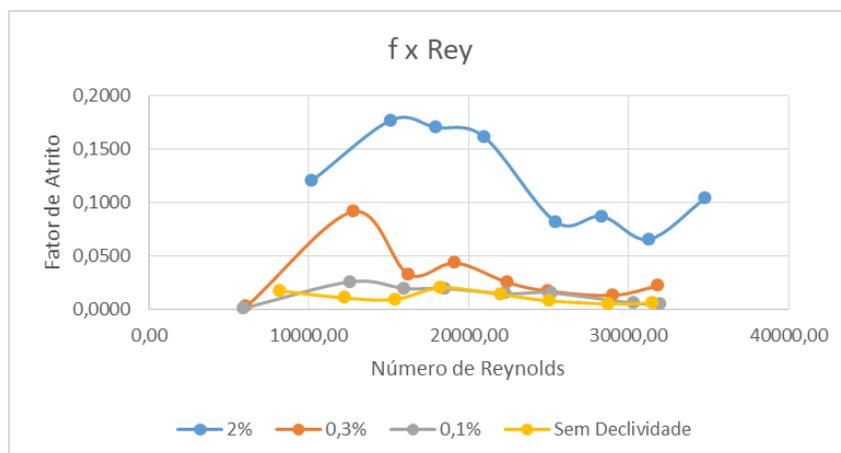


Figura 7 - Comparação de 'f' versus Número de Reynolds nas diferentes declividades simuladas.

No ábaco de Moody é possível observar que o 'f' varia em relação ao Reynolds de forma decrescente, o que não ocorreu no caso de estudo físico. Alguns pontos que possam ter causado essa discrepância são: o fato de o Ansys não medir declividade em porcentagem, visto que são baixas declividades que alteram significativamente o resultado; e a malha não ter sido muito refinada devido às limitações da versão estudantil, porque, ao se tratar de simulação computacional, quanto mais refinada, mais os resultados refletem a realidade.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi possível observar que nas paredes e na parte inferior do canal liso a velocidade é quase nula e que a velocidade maior localiza-se no centro do escoamento. Além disso, notou-se que, com o aumento da distância da entrada, ocorreu o aumento da velocidade.

Verificou-se que quanto maior a declividade do canal maior Número de Reynolds, e, também o Coeficiente de Manning e, em todos os casos, o escoamento foi turbulento e subcrítico (obtido através no Número de Froude). Observou-se, ainda, que o fator de atrito aumenta à medida que se eleva a declividade. Logo, em casos de maiores declividades, mais elevado é o fator de atrito, o que resulta em uma maior perda de carga.

A análise da rugosidade relativa apresentou a diminuição do parâmetro em conjunto com a declividade e o Fator de Atrito 'f' não variou de forma decrescente, assim como no ábaco de Moody.

REFERÊNCIAS

- CHADWICK, A; MORFETT, J. (1998). *Hidráulica em Engenharia Civil e Ambiental*. Coleção: Ciência e Técnica. Instituto Piaget.
- CHOW, V.TE. (1959). *Open Channel Hydraulics*. EESC/USP São Carlos- SP, 728 p.
- DINIZ, L. S. (1999). “Calibragem de modelos hidrológicos”, in *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Org. por Galvão, C.O. e Valença, M.J.S., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 151 – 164
- Gavira, M. DE O. *Simulação Computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento*. p. 163, 2003.
- PORTO, R.M. (2006). *Hidráulica Básica*. EESC/USP São Carlos- SP, 540 p.
- RICO, E. A. M. “Influência da Taxa de Infestação de *Limnoperna Fortunei* no Aumento da Perda de Carga Em Sistemas Hidráulicos”. Tese (Pós-graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p 159. 2018.