

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA LINHA D'ÁGUA, EM CANAIS PRISMÁTICOS, CONSIDERANDO ESCOAMENTO GRADUALMENTE VARIADO, CAUSADO POR UMA SEÇÃO DE CONTROLE.

Rejane Felix Pereira¹, Raquel Jucá de Moraes Sales², Juliana Alencar Firmo de Araújo³, Karla de Carvalho Vasconcellos⁴

RESUMO – Este trabalho trata de uma análise do comportamento da linha d'água em um canal prismático, com extremidade livre, onde a água deverá sofrer uma queda livre, tomando esta seção como uma seção de controle. Para este estudo foram consideradas algumas simulações, onde as profundidades do canal são calculadas em função de diferentes parâmetros. Os parâmetros considerados foram, a vazão, a declividade longitudinal, o coeficiente de rugosidade e o talude das paredes do canal. A equação diferencial que descreve o perfil das profundidades foi resolvida pelo método do passo a passo. Os resultados mostram que estes parâmetros desempenham importantes papéis no comportamento da linha d'água, mas não na mesma intensidade de influência.

ABSTRACT - This paper deals with an analysis of the behavior of the waterline in a prismatic channel, with free bound, where the water will suffer a free fall, turning this section as a control. For this study, it was included some simulations, where the depth of the channel are calculated on the basis of different parameters. The parameters were considered, the flow, the longitudinal slope, the roughness coefficient and slope of the canal walls. The differential equation that describes the profile of the depths was solved by the step method. The results show that these parameters play important roles in the behavior of the water line, but not in the same level of influence

Palavras-Chave – escoamento gradualmente variado, seção de controle em canais, perfil de linha d'água em canais.

1) Mestre e doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CNPq. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. e-mail: rejanefp@gmail.com

2) Mestre e doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CNPq. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. e-mail: raqueljuca@gmail.com;

3) Mestre e doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CAPES. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. e-mail: [judiaraujo@yahoo.com.br](mailto:juliaraujo@yahoo.com.br);

4) Mestranda em Recursos Hídricos Universidade Federal do Ceará e bolsista do CNPq. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. E-mail: karla_vasconcellos@hotmail.com

1.INTRODUÇÃO

O escoamento gradualmente variado é definido como sendo aquele escoamento onde parâmetros hidráulicos variam de forma progressiva ao longo da corrente, mas permanecendo constante com relação ao tempo em cada seção do canal. Normalmente este tipo de escoamento em canais ocorre antes de uma seção de controle, que é o ponto que se pode fazer uma relação entre a profundidade e a vazão.

Como coloca Henderson (1966), uma discussão sobre escoamento uniforme mostra claramente que este estado de escoamento pode ser pensado como um controle, desde que, a partir das equações da resistência pode-se ter o cálculo da descarga sendo conhecida a profundidade.

Entretanto este procedimento não está associado com um ponto do canal. Este é o estado em que um escoamento tende a se comportar em um longo canal, quando outras formas de controle estão presentes. Se, por outro lado, há outros tipos de controles, estas estruturas hidráulicas tendem a alterar o estado de escoamento uniforme fazendo com que o mesmo sofra transição, que pode ser gradual ou abrupto, entre dois estados do escoamento.

Na região de transição, o escoamento é geralmente não uniforme e para suas análises há a necessidade do uso de formulação da equação de Chezy de forma diferente daquela usada para o escoamento uniforme. Neste caso, há a necessidade de se trocar a declividade do fundo do canal, usada no escoamento uniforme, para a declividade da linha de energia, e proceder as devidas alterações nas formulações.

Uma das análises mais frequentes neste tipo de escoamento trata do estudo do comportamento da linha d'água proveniente da presença de uma estrutura de controle qualquer nas proximidades de uma região do canal. Neste caso, novas formulações são necessárias para que se tenha uma melhor capacidade de análise.

Este trabalho pretende resolver a equação diferencial da linha d'água de um canal retangular, que se aproxima de uma queda livre, e verificar a influência dos parâmetros hidráulicos e geométricos afetam esta linha d'água. O estudo faz uma análise, verificando o comportamento da profundidade, com a variação da vazão, da declividade do fundo, da variação dos taludes e da variação do número de Manning para ver de que forma, essas variações alteram o comportamento das profundidades em diferentes seções do canal, na medida em que a água se aproxima da borda livre.

Os resultados mostraram que a variação do ângulo das paredes do canal é o que exerce menor influência no comportamento da linha d' água, mostrando assim que este elemento geométrico não exerce muito influencia no comportamento do escoamento não uniforme.

2. FORMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático para estudar esta classe de problema deve partir da dedução da equação da resistência de Chezy para escoamento não uniforme. Assim, aplicando a lei de conservação da quantidade do movimento a volume de controle genérico tem-se:

$$-\gamma A \Delta h - \tau_0 P \Delta x = \rho A v \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \quad (1)$$

Onde,

τ_0 = Tensão de cisalhamento de fundo;

h = profundidade da linha d' água;

A = área da seção transversal;

V = velocidade na direção x;

x = distancia ao longo do canal;

P = Perímetro molhado;

γ = peso específico da água.

Combinando esta a equação (1) com a equação de Chezy pode-se chegar a equação abaixo,

$$\frac{dH}{dx} = \frac{d}{dx} \left(z + y + \frac{v^2}{2g} \right) = S_f = - \frac{v^2}{RC^2} \quad (2)$$

Onde,

R= Raio Hidráulico;

C = Coeficiente de Chezy;

y = Profundidade;

z = cota de fundo;

g = aceleração da gravidade.

Rearrmando a equação (2) se tem,

$$\frac{dE}{dx} = S_0 - S_f \quad (3)$$

Onde,

E = Energia Específica;

S_0 = Declividade de fundo do canal;

S_f = Declividade da linha de energia.

Esta equação ainda pode se escrita na forma,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - F^2} \quad (4)$$

Onde,

Fr = número de Froude.

A equação (4) é uma equação diferencial não linear que permite que se calcule o perfil da linha d'água para um canal sujeito a qualquer estrutura de controle. Sua solução pode ser obtida com uso de vários métodos disponíveis na literatura.

3. SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL DA LINHA D'ÁGUA

Para este trabalho foi proposto à solução da equação (4) pelo método do passo a passo. Este método consiste em transformar a equação diferencial proposta em uma equação de diferença na forma,

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = S_0 - \frac{v^2}{RC^2} \quad (5)$$

Desta maneira, esta equação pode ser resolvida passo a passo, desde que sejam conhecidos os parâmetros hidráulicos e geométricos do canal. Para este trabalho foram usados os seguintes elementos;

- Canal com seção trapezoidal, com boca livre no em uma extremidade do canal. Isto quer dizer que haverá uma queda livre da água no final do trecho do canal;
- Largura da base do canal igual a 20 ft;
- Número de Manning variável para diferentes simulações;
- Declividade de Fundo Variável para diferentes simulações;
- Vazão variável diferentes para diferentes simulações;
- Talude variável para diferentes simulações;

4. RESULTADOS

Para este trabalho foram feitas várias simulações para diferentes vazões, diferentes rugosidade, diferentes declividade de fundo e para diferentes taludes, analisando a sensibilidade da equação (4) diante destes parâmetros.

A tabela 1 expõe os cálculos da linha d'água para uma vazão igual a 200 ft³/s; $S_0=0,001$; $n=0,025$, e talude de 3:2 (H:V). O roteiro de cálculo para este tabela é seguida conforme a equação (5). Os resultados mostram que a, para este ensaio, a profundidade normal ocorre a 400 ft da borda.

Tabela 1 – Cálculo da linha d'água para vazão igual a 200 ft³/s; $S_0=0,001$; $n=0,025$.

Tabela para a determinação do perfil de profundidades nas proximidades da queda													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
y	A	P	R _H	C ²	V	V ² /2g	E	V ² /C ² R _H	(V ² /C ² R _H) _m	(S ₀ - V ² /C ² R _H) _m	ΔE	Δx	x = ΣΔx
1.41	31.1	25.06	1.24	3817	6.43	0.642	2.049	0.00873					0
									0.00760	-0.00660	0.017	-3	
1.54	34.3	25.53	1.34	3919	5.83	0.529	2.066	0.00647					-3
									0.00569	-0.00469	0.043	-9	
1.67	37.5	26.00	1.44	4014	5.33	0.441	2.109	0.00491					-12
									0.00435	-0.00335	0.062	-19	
1.80	40.8	26.47	1.54	4103	4.90	0.373	2.171	0.00380					-30
									0.00340	-0.00240	0.076	-32	
1.93	44.1	26.94	1.64	4187	4.53	0.319	2.247	0.00299					-62
									0.00269	-0.00169	0.086	-51	
2.06	47.5	27.41	1.73	4267	4.21	0.275	2.333	0.00239					-113
									0.00217	-0.00117	0.094	-81	
2.19	51.0	27.88	1.83	4343	3.93	0.239	2.428	0.00194					-194
									0.00177	-0.00077	0.101	-131	
2.32	54.4	28.35	1.92	4415	3.67	0.210	2.528	0.00159					-325
									0.00146	-0.00046	0.105	-231	
2.45	58.0	28.82	2.01	4484	3.45	0.185	2.634	0.00132					-556

A tabela 2 apresenta os cálculos da linha d'água para uma vazão igual a 400 ft³/s, com os outros parâmetros mantidos segundo a simulação anterior. Os resultados mostram que, para este caso, a influência dos efeitos do controle é sentido a uma distancia de 800 ft da seção de controle. Pelo resultado entende-se que o comportamento da linha d'água é muito sensível à vazão do rio.

Tabela 2. - Calculo da linha d'água para vazão igual a 400 ft³/s; S₀=0,001; n=0,025.

Tabela para a determinação do perfil de profundidades nas proximidades da queda													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
y	A	P	R _H	C ²	V	V ² /2g	E	V ⁴ /C ² R _H	(V ⁴ /C ² R _H) _m	(S ₀ - V ⁴ /C ² R _H) _m	ΔE	Δx	x = ΣΔx
2.19	50.9	27.87	1.83	4342	7.86	0.959	3.146	0.00778	0.00684	-0.00584	0.022	-4	0
2.37	55.8	28.54	1.96	4443	7.16	0.797	3.168	0.00590	0.00523	-0.00423	0.057	-14	-4
2.55	60.9	29.20	2.09	4538	6.57	0.671	3.225	0.00456	0.00408	-0.00308	0.083	-27	-17
2.74	66.0	29.86	2.21	4627	6.06	0.570	3.309	0.00359	0.00323	-0.00223	0.103	-46	-44
2.92	71.2	30.52	2.33	4712	5.61	0.490	3.411	0.00287	0.00259	-0.00159	0.118	-74	-91
3.11	76.6	31.18	2.46	4792	5.22	0.424	3.529	0.00232	0.00211	-0.00111	0.129	-117	-165
3.29	82.0	31.84	2.58	4869	4.88	0.370	3.659	0.00190	0.00173	-0.00073	0.138	-189	-281
3.47	87.5	32.50	2.69	4942	4.57	0.324	3.797	0.00157	0.00144	-0.00044	0.146	-332	-470
3.66	93.2	33.16	2.81	5012	4.29	0.286	3.942	0.00131					-802

Na tabela 3 estão esboçados os cálculos da linha d'água para uma vazão de 600 ft³/s, mantidos os demais parâmetros anteriores. Os resultados mostram que, para este caso, a influência do controle é sentido pela linha escoamento em um ponto situado a 950 ft da seção de controle. A partir deste resultado, entende-se que entre uma vazão de 200 e uma de 600 ft³/s, houve uma considerável mudança no comportamento da linha d'água, verifica-se ainda que esta variação é linear em relação à variação da vazão.

Tabela 3. - Calculo da linha d'água para vazão igual a 600 ft³/s; S₀=0,001; n=0,025.

Tabela para a determinação do perfil de profundidades nas proximidades da queda													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
y	A	P	R _H	C ²	V	V ² /2g	E	V ⁴ /C ² R _H	(V ⁴ /C ² R _H) _m	(S ₀ - V ⁴ /C ² R _H) _m	ΔE	Δx	x = ΣΔx
2.82	68.3	30.15	2.26	4665	8.79	1.200	4.018	0.00731	0.00646	-0.00546	0.026	-5	0
3.04	74.7	30.95	2.41	4765	8.03	1.003	4.043	0.00561	0.00500	-0.00400	0.067	-17	-5
3.26	81.2	31.75	2.56	4859	7.39	0.847	4.111	0.00439	0.00393	-0.00293	0.098	-34	-22
3.49	88.0	32.55	2.70	4948	6.82	0.723	4.209	0.00348	0.00314	-0.00214	0.122	-57	-55
3.71	94.8	33.35	2.84	5032	6.33	0.622	4.331	0.00280	0.00254	-0.00154	0.140	-91	-112
3.93	101.8	34.15	2.98	5112	5.89	0.540	4.471	0.00228	0.00208	-0.00108	0.154	-143	-203
4.15	109.0	34.95	3.12	5189	5.51	0.471	4.625	0.00187	0.00172	-0.00072	0.165	-231	-346
4.38	116.3	35.76	3.25	5263	5.16	0.414	4.790	0.00156	0.00143	-0.00043	0.174	-406	-577
4.60	123.7	36.56	3.38	5333	4.85	0.365	4.965	0.00130					-983

A figura 1 ilustra os gráficos da linha d'água para as três simulações anteriores. Através desta figura pode-se ver que a sensibilidade da linha d'água é considerável com relação à variação da vazão. O resultado, como esperado, mostra que a variação da vazão altera a profundidade crítica de acordo com as formulações clássicas para o cálculo desta grandeza.

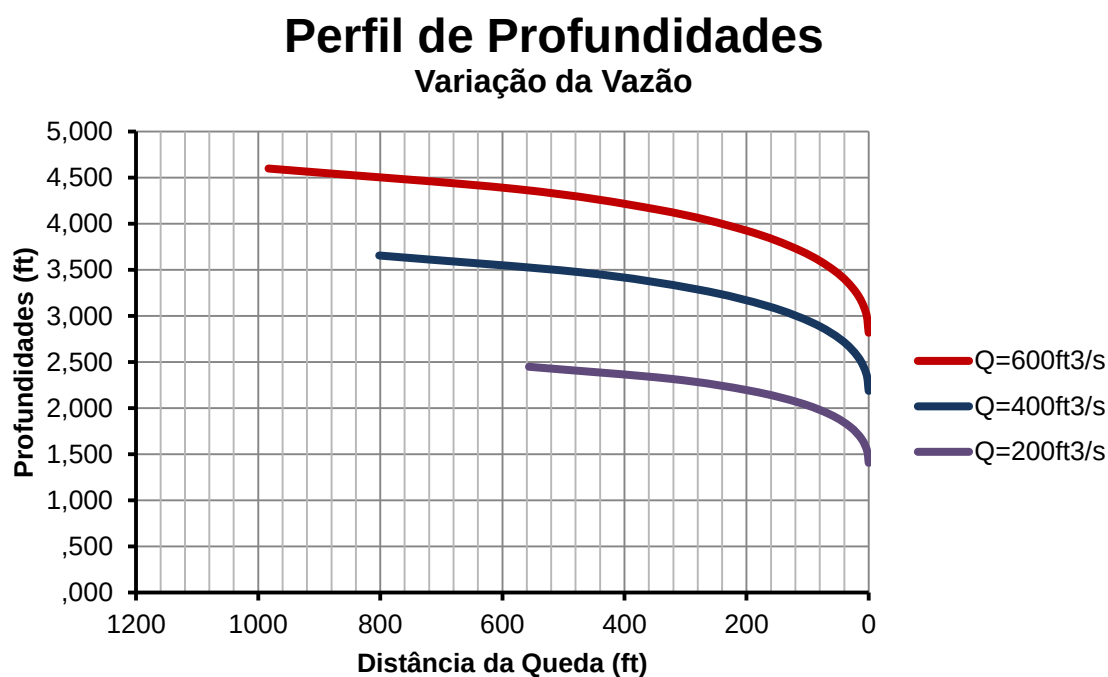


Figura1. – Comportamento da linha d'água para diferentes vazões.

A tabela 4 espõe o cálculo da linha d'água para vazão igual a 200 ft³/s; $S_0=0,001$; $n=0,02$. Para esta simulação, os resultados implicam que a sensibilidade da linha d'água à variação da rugosidade não é tão expressiva quando à variação da vazão, no que diz respeito a profundidade do canal. Entretanto, quando se observa a influência do escoamento com respeito ao controle, este parâmetro torna-se mais interessante. Como pode ser observada, a variação da rugosidade de 0,025 para 0,02, faz com que o escoamento normal deixe de ocorrer a 200 ft de diferença, o que é uma distancia significativa, para os padrões em que se está analisando.

Tabela 4. Calculo da linha d'água para vazão igual a 200 ft³/s; S₀=0,001; n=0,02.

Tabela para a determinação do perfil de profundidades nas proximidades da queda													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
y	A	P	R _H	C ²	V	V ² /2g	E	V ² /C ² R _H	(V ² /C ² R _H) _m	(S ₀ - V ² /C ² R _H) _m	ΔE	Δx	x = ΣΔx
1,41	31,1	25,06	1,24	5965	6,43	0,642	2,049	0,00558					0
1,50	33,4	25,40	1,31	6079	5,99	0,558	2,058	0,00450	0,00504	-0,00404	0,009	-2	-2
1,59	35,7	25,73	1,39	6187	5,61	0,489	2,081	0,00367	0,00409	-0,00309	0,023	-8	-10
1,69	38,0	26,07	1,46	6291	5,27	0,431	2,116	0,00303	0,00335	-0,00235	0,035	-15	-25
1,78	40,3	26,40	1,53	6391	4,96	0,383	2,160	0,00253	0,00278	-0,00178	0,044	-25	-50
1,87	42,7	26,73	1,60	6486	4,69	0,341	2,212	0,00212	0,00232	-0,00132	0,052	-39	-88
1,96	45,0	27,07	1,66	6577	4,44	0,306	2,269	0,00180	0,00196	-0,00096	0,057	-60	-148
2,06	47,5	27,40	1,73	6665	4,21	0,276	2,332	0,00154	0,00167	-0,00067	0,062	-93	-241
2,15	49,9	27,74	1,80	6750	4,01	0,250	2,398	0,00132	0,00143	-0,00043	0,066	-154	-396

Na tabela 5 apresentam-se os cálculos da linha d'água para um coeficiente de rugosidade igual a 0,015. Pelos resultados, verifica-se que a influência da seção de controle na transformação do comportamento do escoamento de uniforme para gradualmente variado ocorre a uma distancia de 560 ft, mostrando assim que este parâmetro é determinante na transformação do comportamento do regime de escoamento, nas vizinhanças de seções de controle.

Tabela 5. Calculo da linha d'água para vazão igual a 200 ft³/s; S₀=0,001; n=0,015.

Tabela para a determinação do perfil de profundidades nas proximidades da queda													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
y	A	P	R _H	C ²	V	V ² /2g	E	V ² /C ² R _H	(V ² /C ² R _H) _m	(S ₀ - V ² /C ² R _H) _m	ΔE	Δx	x = ΣΔx
1,41	31,1	25,06	1,24	10604	6,43	0,642	2,049	0,00314					0
1,46	32,3	25,25	1,28	10716	6,18	0,594	2,052	0,00279	0,00296	-0,00196	0,003	-1	-1
1,51	33,6	25,43	1,32	10826	5,95	0,551	2,059	0,00248	0,00263	-0,00163	0,008	-5	-6
1,56	34,8	25,61	1,36	10932	5,74	0,512	2,071	0,00222	0,00235	-0,00135	0,012	-9	-15
1,61	36,1	25,80	1,40	11036	5,54	0,477	2,087	0,00199	0,00210	-0,00110	0,016	-14	-29
1,66	37,4	25,98	1,44	11137	5,35	0,445	2,106	0,00179	0,00189	-0,00089	0,019	-21	-51
1,71	38,6	26,16	1,48	11236	5,18	0,416	2,128	0,00161	0,00170	-0,00070	0,022	-31	-82
1,76	39,9	26,35	1,52	11333	5,01	0,390	2,153	0,00146	0,00154	-0,00054	0,025	-46	-128
1,81	41,2	26,53	1,55	11427	4,85	0,366	2,180	0,00133	0,00139	-0,00039	0,027	-68	-196

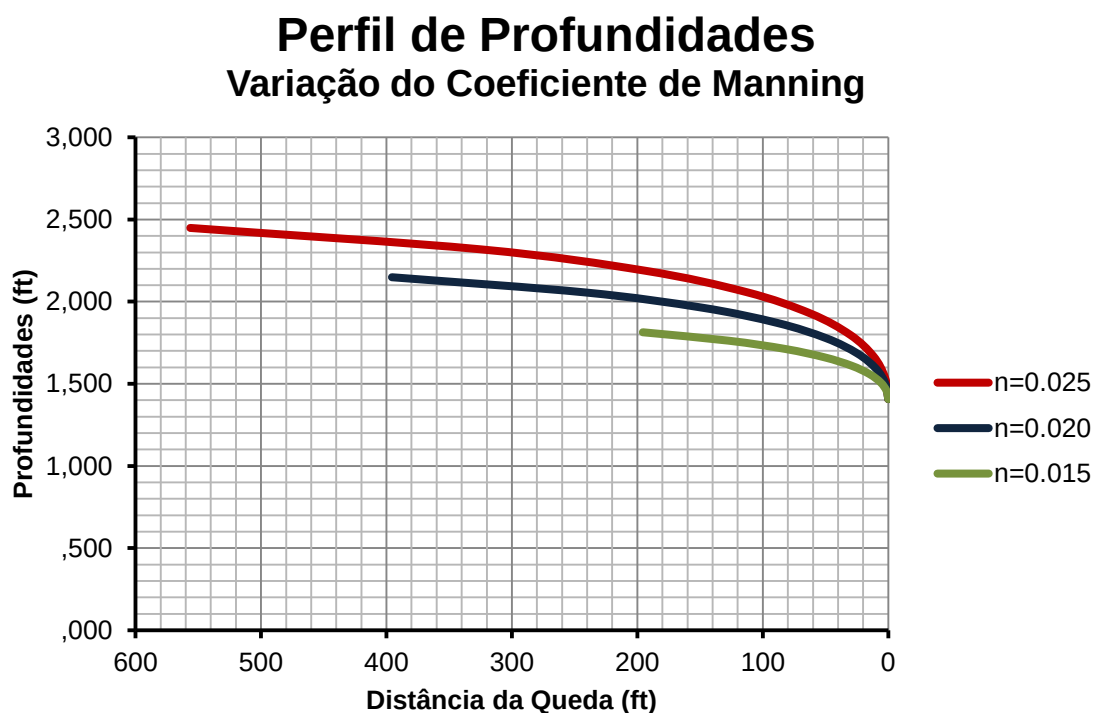


Figura 2. – Comportamento da linha d'água para diferentes coeficientes de rugosidade.

A figura 2 ilustra os diferentes perfis da linha d'água para este conjunto de simulações. Como pode ser observado, a alteração do coeficiente de rugosidade não altera de forma considerável as profundidades, mas exerce um papel importante na transição do escoamento de uniforme para gradualmente variado. Neste caso, o comportamento da linha d'água é tão sensível a este parâmetro quanto foi para a variação da vazão. Por outro lado, através da figura é possível verificar que quanto maior for o número de Manning, maior serão as profundidades na zona de escoamento gradualmente variado.

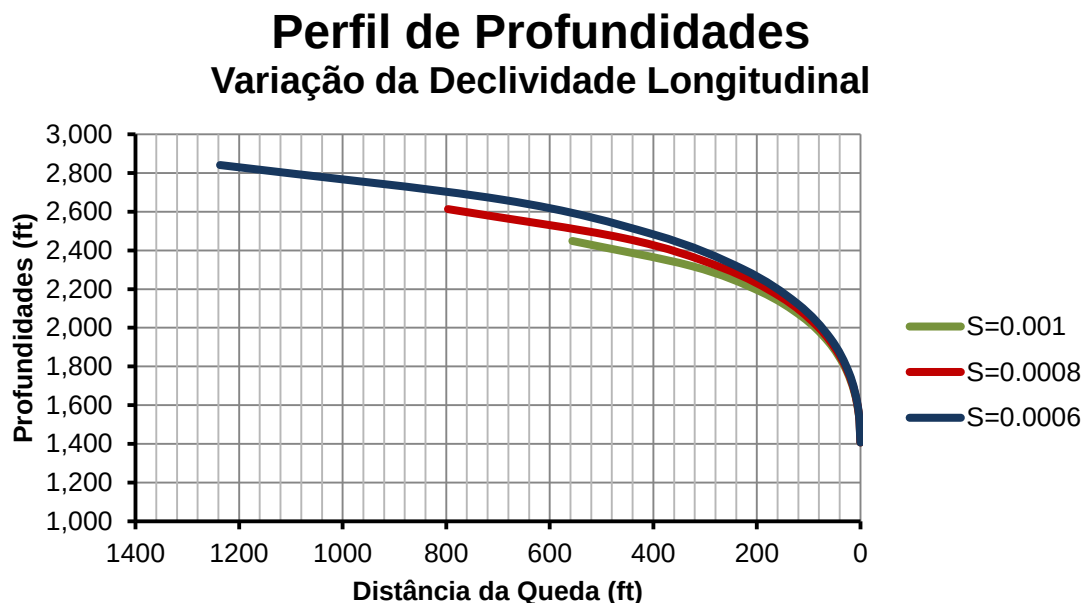


Figura 3. - Comportamento da linha d'água para diferentes declividades longitudinais.

Na figura 3 estão ilustrados os resultados das simulações para diferentes declividades longitudinais. Pela figura pode-se ver que este parâmetro é pouco sensível para as profundidades do canal, no desenvolvimento do movimento gradualmente variado. No entanto, os resultados mostram que a transição ocorre em diferentes distancias da seção de controle. Neste caso, a transição do escoamento é muito sensível a este parâmetro. Por exemplo, para uma declividade de 0,001, a transição ocorre a 480 ft da seção de controle. Já para a declividade de fundo igual a 0,0006, esta transição ocorre a 1220 ft do referido ponto. Esta diferença comprova a importância deste parâmetro nos estudos dos canais nas regiões de controle. Outra observação importante é que quanto maior for a declividade menor é a profundidade do canal. Este resultado é esperado, considerando os métodos clássicos de cálculo da profundidade para canais.

Perfil de Profundidades Variação do Talude das Paredes

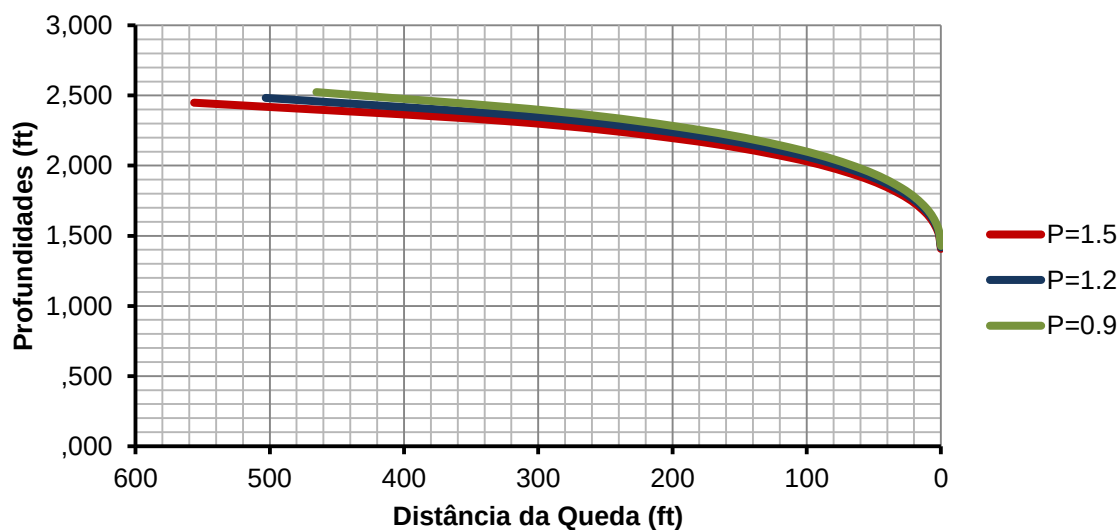


Figura 4. - Comportamento da linha d'água para diferentes taludes de paredes do canal.

A figura 4 ilustra os perfis de profundidade para diferentes taludes de paredes do canal. Foram analisados três valores, sendo o menor igual a 0,9 e o maior igual a 1,5. Através dos resultados, entende-se que o comportamento dos perfis não se alteram como aconteceram nas outras simulações. Neste caso, tanto do ponto de vista de profundidade, como do ponto de vista de distancia da seção de controle, as diferenças são pequenas, o que permite concluir que uma variação neste parametro não atara de forma significativa o comportamento do perfil.

5. CONCLUSÕES

Para um escoamento gradualmente variado estudou-se o comportamento do perfil das profundidades em um canal prismático com extremidade livre de controle. Os resultados permitiram concluir que para os diferentes condições tomadas nas simulações, o coeficiente da rugosidade e a vazão são os parametros que mais influênciam o comportamento da linha d'água, tanto do ponto de vista de profundidade como do ponto de vista de transição entre o escoamento uniforme e o escoamento gradualmente variado.

Pelo resultados, permitiram-se concluir também que a declividade dos taludes não exerce papel importante no comportamento do perfil de linha d'água. Outra conclusão que pode ser tirada é que com relação à declividade longitudinal do fundo do canal. Este

parâmetro desempenha um papel significartivo somente na transição do escoamento uniforme para o escoamento gradualmente variado.

BIBLIOGRAFIA

BRAGA, B. P. F. Non-structural flood control measures–introductory notes for a special issue of urban waters. **Urban Water**, [S. L.], v. 1, p. 112, 1999.

CHALFEN, Mieczyslaw; NIEMIEC, Andrzej. Analytical and numerical solution of Saint–Venant equations. **Journal of Hydrology**, Poland, v. 86, p. 1-13, Feb. 1986.

CHOW, V. T., **Open–channel hydraulics**. McGraw–Hill, New York, N. Y., 1959, 680 p.

FRENCH, R. H. **Open Channel Hydraulics**, B&JO Enterprise PTE LTD, 1986.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**, Macmillian Publishing Co. Inc. 1966.

RAJARATNAM, N.; AHMADI, R. Hydraulics of channels with flood-plains. **Journal of Hydraulic Research**, {S. L.}, v.19, n.1, p. 43 – 60. 1981.

RASHID, Mizanur R. S. M.; CHAUDHRY, M. Hanif. Flood routing in channels with flood plains. **Journal of Hydrology**, USA, v. 171, p. 75–91. 1995.

SHEN, H. W; YEN, B. C. Advances in open-channel hydraulics after V.T. Chow`s book. **Journal of Hydrology**, [S. L.], v. 64, p. 333–348. 1984.

YEN, B. C., Open–channel flow equations revisited. **Water Resources**, [S. L.], n. 51, p. 979–1009. 1973.