

PROPAGAÇÃO DE CHEIAS EM RESERVATÓRIOS: o caso do Lago Municipal de Cascabel - PR

ELOY KAVISKY¹ ; LAERTES MUNHOZ DA CUNHA² & CANDICE SCHAUFFERT GARCIA³

RESUMO: Pelo princípio de conservação de massa pode-se descrever de forma simplificada o escoamento não-permanente que se propaga através de um reservatório. O modelo matemático resultante é representado por uma equação diferencial ordinária. Em escoamentos não-permanentes através de reservatórios que não são excessivamente longos e em que os hidrogramas de entrada não variam abruptamente com o tempo a equação diferencial pode ser solucionada assumindo-se a hipótese de que a superfície do reservatório é horizontal. Neste trabalho mostra-se o hidrograma defluente do reservatório do lago municipal de Cascabel-PR, abatido pelo efeito de amortecimento, onde a equação do balanço hídrico foi solucionada através de um método iterativo de integração, com a aplicação da regra do trapézio.

ABSTRACT: For the principle of mass conservation the unsteady flow reservoir routing can be described of simplified form. The resultant mathematical model is a ordinary differential equation. Unsteady flow routing in reservoirs which are not excessively long and in which the inflow hydrograph is not rapidly changing with time the differential equation can be solved assuming it hypothesis of that the water surface of the reservoir is horizontal. In this work the reservoir outflow hydrograph of the municipal lake of Cascabel - PR, abated for the damping effect, where the equation of the water balance was solved through an iterative trapezoidal integration method.

Palavras-chave: Hidrograma unitário, balanço hídrico, abatimento do pico de cheia.

¹ Eng^o Civil, D. Sc., Professor assistente da UFPR. Curitiba – Paraná – Brasil. Contato: ekavisky.dhs@ufpr.br/ +55 41 3361 3209

² Eng^o Civil, M. Sc., Professor adjunto da UFPR. Curitiba – Paraná – Brasil. Contato: laertes.dhs@ufpr.br/ +55 41 3361 3209

³ Eng^a Civil, M.Sc., Engenheira Hidróloga da SANEPAR, Professora substituta da UFPR, Consultora da RHA Engenharia e Consultoria Ltda. Curitiba – Paraná – Brasil. Contato: csgarcia@rhaengenharia.com.br / +55 41 3232 0732.

INTRODUÇÃO

Reservatórios têm a capacidade de amortecimento das ondas de enchente que a eles afluem. A eficiência deste efeito depende do volume vazio disponível no reservatório no início da ascensão das vazões e das curvas de descarga dos órgãos extravasores. No presente trabalho, fruto de uma pesquisa desenvolvida, pretende-se avaliar o grau de amortecimento exercido pelo lago existente na área urbana do município de Cascavel-PR, o qual drena uma área de 6,527Km², de uma região em elevado grau de urbanização. Devido à inexistência de dados observados de vazão que possam representar o comportamento hidrológico da bacia em situações de enchentes (enchentes urbanas), fez-se uso do modelo de transformação chuva-vazão, denominado hidrograma unitário, para a obtenção de hidrogramas de enchentes afluentes ao reservatório, cobrindo diferentes cenários associados a diferentes tempos de recorrência e diferentes coeficientes de escoamento. A curva de descarga do vertedor livre, de forma semicircular, foi estimada com base nos princípios da Hidráulica, o mesmo acontecendo com a curva-chave do descarregador de fundo existente. Os resultados finais são consequência da simulação da passagem das ondas de enchente (hidrogramas afluentes) pelo reservatório, estabelecidas as condições iniciais, da qual resulta os correspondentes hidrogramas de saída do reservatório.

Os métodos empregados para a análise prevista estão apresentados sucintamente ao longo deste relatório.

HIDROGRAMA AFLUENTE

O Hidrograma Unitário (HU) corresponde ao hidrograma de escoamento superficial resultante sobre a bacia, consequência da ocorrência de uma chuva unitária de duração Δt . Conhecido o $HU(\Delta t)$ pode-se carregá-lo com um episódio de precipitação, composto por seqüências de totais de chuva discretizados em “m” intervalos de tempo Δt , e, por convolução, obter o hidrograma resultante do referido hietograma. A associação do tempo de recorrência ao hidrograma é feita através da precipitação, fazendo uso da relação intensidade-freqüência-duração da chuva, da qual também se obtém o hietograma correspondente.

Hietograma

As chuvas intensas relacionam-se em termos de intensidade, freqüência e duração, através de equações determinadas com base em dados observados. Para a localidade de Cascavel-PR, dispõe-se da equação fornecida por Fendrich apresentada abaixo:

$$i = \frac{1062,92.T_R^{0,141}}{(t + 5)^{0,776}} \quad (1)$$

Onde:

i = intensidade da chuva em mm/h;

T_R = tempo de recorrência em anos;

t = duração da chuva em minutos.

A duração crítica da chuva é geralmente considerada igual ao tempo de concentração da bacia, que corresponde ao tempo necessário para que toda a bacia passe a contribuir para a vazão na exutória. O cálculo do tempo de concentração é baseado em fórmulas empíricas e depende de características fisiográficas da bacia tais como a declividade e comprimento do talvegue principal. No presente caso, utilizou-se a fórmula de Kirpich, com a forma, dados de entrada (nas unidades consideradas) e resultado apresentados abaixo:

$$t_c = 57.\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \quad (2)$$

Onde:

L = 1,87km – comprimento do talvegue principal;

H = 80m – maior desnível entre a exutória e o divisor ;

t_c = 21,73min – tempo de concentração.

Regiões urbanizadas tendem a apresentar menores tempos de concentração, devido à proliferação de áreas impermeáveis que geram velocidades crescentes do escoamento superficial, recomendando-se uma correção que no caso em estudo, subjetivamente, levou a considerar o tempo de concentração igual a 14 minutos.

A aplicação da equação (1) para tempos de recorrência de 10, 25 e 50 anos e para $t = t_c = 14$ min, dá origem aos resultados de intensidade de chuva e totais precipitados apresentados na tabela a seqüência:

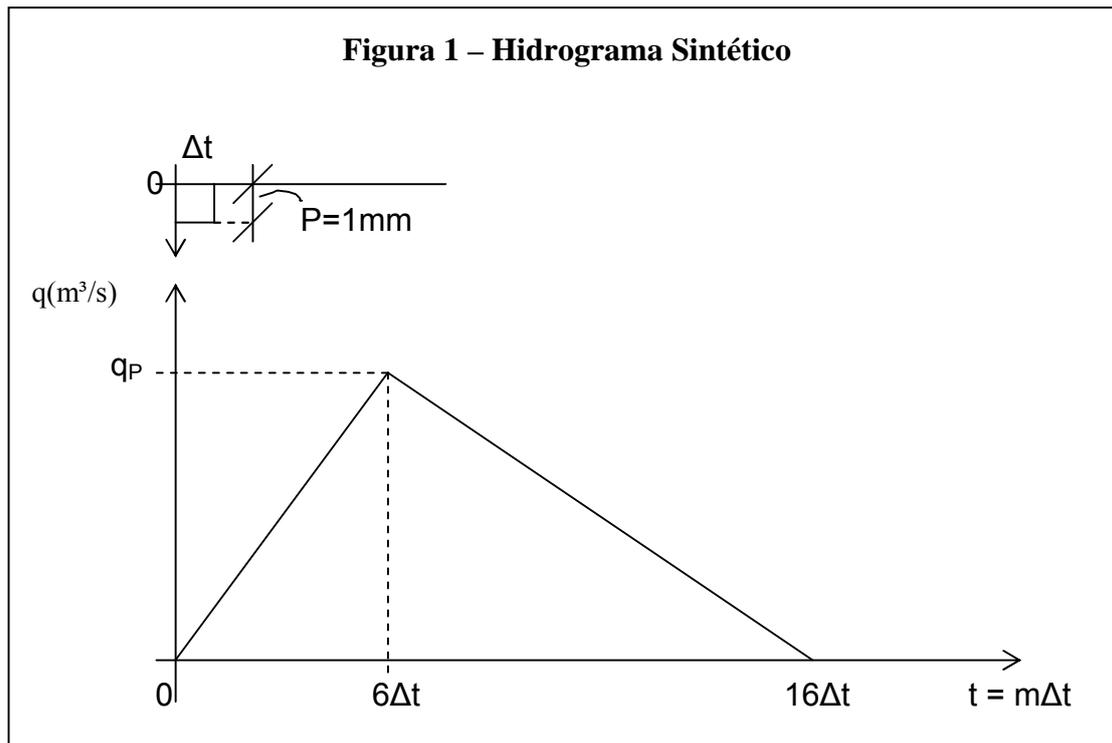
Tabela 1 – Intensidade de Chuva e Totais Precipitados para Diferentes Tempos de Recorrência

T_R (anos)	10	25	50
i (mm/h)	149,69	170,33	187,82
P (mm)	34,93	39,74	43,82

O hietograma fornece o total de chuva subdividido em intervalos de tempo Δt . O intervalo de tempo, que corresponde a duração da chuva unitária, pode ser estimado de várias maneiras, seguindo recomendações práticas constantes na literatura. Assim, o hietograma será composto por uma seqüência de totais de chuva, constantes a cada intervalo Δt , definidos após aplicar a equação (1) “m” vezes, considerando $t = \Delta t$, $t = 2 \Delta t$, $t = 3 \Delta t$, e $t = t_c = m \Delta t$, e cada vez subtraindo a soma dos totais de precipitação obtidos para os intervalos de menor duração. O arranjo da seqüência dos totais precipitados, que dá origem ao hietograma de precipitação efetiva, é feito de modo a maximizar o pico das vazões. A definição da chuva efetiva em cada intervalo foi calculada simplesmente pela multiplicação dos totais de chuva em todos os intervalos por um coeficiente de escoamento que busca representar as características do terreno em termos de declividade e do grau de impermeabilização da bacia. Em praticamente todos os textos de Hidrologia como Holtz e Pinto, (1976) existem descrições sucintas que sugerem a adoção de valores para o coeficiente de escoamento, não deixando de registrar, no entanto a subjetividade desta escolha. No estudo, como cenários alternativos, considerou-se dois coeficientes de escoamento, $C = 0,50$ e $C = 0,80$, que indiretamente caracterizam diferentes graus de impermeabilização da bacia.

Hidrograma Unitário

Para efeito de análise foram determinados dois hidrogramas unitários triangulares, sendo um deles, o proposto pelo SCS – Soil Conservation Service, Pilgrim e Cordery, (1992), correspondendo, no caso, à $\Delta t = 0,9333$ min e tempo de base do hidrograma $TB = 16\Delta t$, ou seja, $TB = 14,933$ min e o outro, hidrograma sintético de Snider, Gomide e Braga, (1979), dando origem à $\Delta t = 1,527$ min e $TB = 24,43$ minutos. Em ambos os casos, a ordenada do pico do hidrograma (qP) corresponde à abcissa $TP = 6\Delta t$, e é tal que produz um volume de escoamento direto unitário, ou seja, volume equivalente a uma precipitação uniforme de 1 mm sobre a bacia, no caso $6527m^3$, conforme apresentado na Figura 1 a seguir.



Hidrogramas Afluentes

A determinação dos hidrogramas de escoamento superficial, hidrogramas afluentes ao reservatório (lago Cascavel-PR), faz-se por convolução das ordenadas do HU sobre os totais de chuva efetiva em cada intervalo de tempo Δt . São apresentados dois grupos de 6 hidrogramas afluentes, cada grupo correspondendo à utilização de um hidrograma unitário (HU1 e HU2), e para cenários de tempos de recorrência de 10, 25 e 50 anos e coeficientes de escoamento de 0,50 e 0,80, desprezando as abstrações iniciais, fato que aumenta os picos e volumes escoados. Desprezando o escoamento de base, que em pequenas bacias torna-se insignificante frente às vazões de enchente (escoamento superficial), os hidrogramas afluentes obtidos estão apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Hidrogramas Afluentes

Método HU ($\delta t = 0,9333\text{min}$) - Abstrações Iniciais = 0								Método HU ($\delta t = 1,53\text{min}$) - Abstrações Iniciais = 0						
Nº	t (min)	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	t (min)	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50
		C = 0,80			C = 0,52				C = 0,80			C = 0,52		
1	0,93	5,99	6,82	7,52	3,90	4,43	4,89	1,53	4,36	4,96	5,47	2,83	3,22	3,55
2	1,87	19,14	21,78	24,01	12,44	14,16	15,61	3,05	14,19	16,15	17,80	9,22	10,49	11,57
3	2,80	35,65	40,57	44,73	23,17	26,37	29,08	4,58	31,26	35,58	39,23	20,32	23,12	25,50
4	3,73	74,12	84,34	93,00	48,18	54,82	60,45	6,11	58,70	66,80	73,66	38,16	43,42	47,88
5	4,67	112,33	127,82	140,95	73,01	83,08	91,61	7,64	89,74	102,12	112,60	58,33	66,38	73,19
6	5,60	155,02	176,39	194,50	100,76	114,66	126,43	9,16	123,83	140,91	155,37	80,49	91,59	100,99
7	6,53	192,07	218,56	240,99	124,84	142,06	156,65	10,69	153,59	174,77	192,71	99,83	113,60	125,26
8	7,47	221,22	251,73	277,57	143,79	163,62	180,42	12,22	176,92	201,32	221,98	115,00	130,86	144,29
9	8,40	239,54	272,57	300,56	155,70	177,17	195,36	13,75	190,73	217,04	239,32	123,98	141,07	155,56
10	9,33	242,91	276,41	304,79	157,89	179,67	198,12	15,27	189,84	216,02	238,20	123,40	140,42	154,83
11	10,27	240,74	273,94	302,07	156,48	178,06	196,34	16,80	183,20	208,46	229,87	119,08	135,50	149,41
12	11,20	233,87	266,13	293,45	152,02	172,98	190,74	18,33	171,67	195,34	215,40	111,59	126,97	140,01
13	12,13	222,96	253,71	279,76	144,92	164,91	181,84	19,85	155,91	177,41	195,63	101,34	115,32	127,16
14	13,07	208,52	237,28	261,64	135,54	154,23	170,06	21,38	136,43	155,25	171,18	88,68	100,91	111,27
15	14,00	190,96	217,30	239,61	124,12	141,24	155,74	22,91	113,62	129,29	142,57	73,85	84,04	92,67
16	14,93	168,74	192,02	211,73	109,68	124,81	137,62	24,44	87,82	99,93	110,19	57,08	64,95	71,62
17	15,87	145,85	165,97	183,00	94,80	107,88	118,95	25,96	64,62	73,53	81,08	42,00	47,80	52,70
18	16,80	123,30	140,31	154,71	80,15	91,20	100,56	27,49	44,71	50,88	56,10	29,06	33,07	36,47
19	17,73	102,35	116,47	128,43	66,53	75,70	83,48	29,02	29,15	33,17	36,58	18,95	21,56	23,77
20	18,67	84,69	96,37	106,26	55,05	62,64	69,07	30,55	19,81	22,54	24,85	12,87	14,65	16,15
21	19,60	66,90	76,13	83,94	43,49	49,48	54,56	32,07	12,62	14,36	15,84	8,20	9,34	10,29
22	20,53	51,80	58,95	65,00	33,67	38,32	42,25	33,60	7,27	8,27	9,12	4,72	5,37	5,93
23	21,47	39,08	44,47	49,04	25,40	28,91	31,87	35,13	3,50	3,98	4,39	2,27	2,59	2,85
24	22,40	28,48	32,41	35,74	18,51	21,07	23,23	36,65	1,13	1,28	1,41	0,73	0,83	0,92
25	23,33	19,80	22,53	24,84	12,87	14,64	16,15	38,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	24,27	12,86	14,64	16,14	8,36	9,52	10,49							

Tabela 2 - Hidrogramas Afluentes

Método HU ($\delta t = 0,9333\text{min}$) - Abstrações Iniciais = 0								Método HU ($\delta t = 1,53\text{min}$) - Abstrações Iniciais = 0						
Nº	t (min)	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	t (min)	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50
		C = 0,80			C = 0,52				C = 0,80			C = 0,52		
27	25,20	7,53	8,57	9,45	4,90	5,57	6,14							
28	26,13	3,68	4,19	4,62	2,39	2,72	3,00							
29	27,07	1,20	1,36	1,50	0,78	0,89	0,98							
30	28,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							

CURVA DE DESCARGA DOS ÓRGÃOS EXTRAVASORES

O lago do município de Cascavel dispõe de um vertedor de superfície em poço e um descarregador de fundo. A Figura 2 a seqüência apresenta a informação disponível sobre os órgãos extravasores.

A curva de descarga do vertedor de superfície, a rigor só poderia ser definida com apoio experimental, porém, simplificada, com base nas leis da hidráulica e considerando o aspecto particular do referido vertedor, adotou-se a relação entre nível da água e vazão vertida, expressa por uma equação do tipo, Lencastre, (1972):

$$Q = (C_1 L + C_2 \theta R) H^{3/2}$$

Onde: (3)

C_1 e C_2 = Coeficientes de descarga segundo Pinto, (1987);

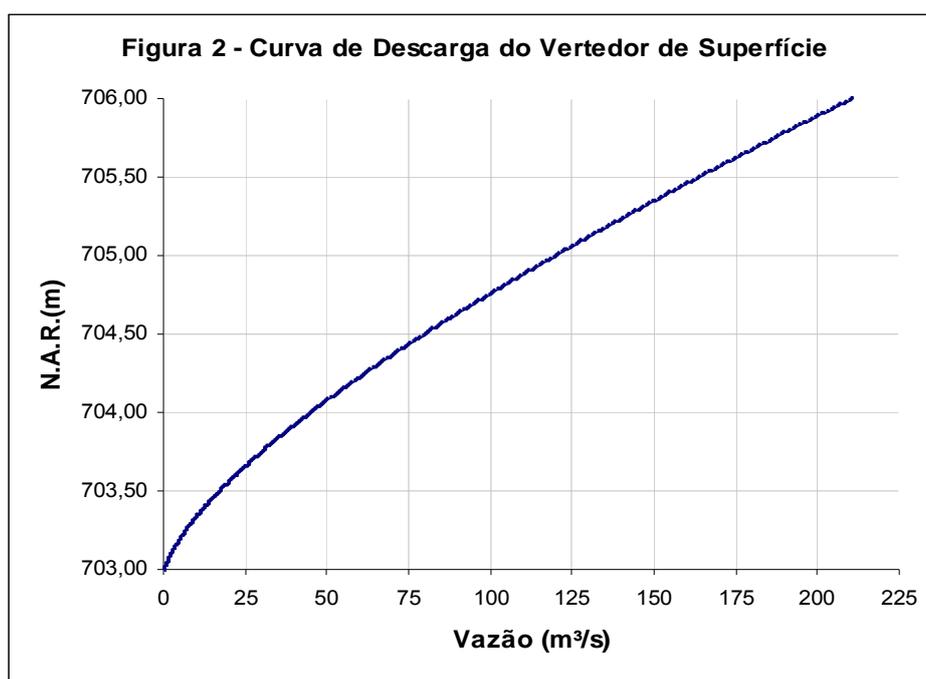
L = comprimento da crista no trecho retilíneo;

θ = ângulo do setor circular da soleira;

R = raio do círculo;

H = carga sobre a crista.

O gráfico correspondente à curva de descarga é apresentado na Figura 2 abaixo. A provável pequena capacidade de descarga do descarregador de fundo, comparada com a descarga do vertedor de superfície, aliada à carência de informações fez com que nas simulações da passagem da onda de cheia pelo reservatório, fosse considerado sempre o descarregador de fundo fechado, sem contribuir para a descarga do volume armazenado no lago.



PROPAGAÇÃO DE CHEIAS EM RESERVATÓRIOS

Pelo princípio de conservação de massa pode-se descrever de forma simplificada o escoamento não-permanente que se propaga através de um reservatório. Conhecendo-se o hidrograma de vazões afluentes ao reservatório $I(t)$, o problema consiste em determinar o hidrograma de vazões defluentes $Q(t,V)$, sendo V o volume do reservatório. O princípio de conservação de massa que governa as variações de volume no reservatório em relação ao tempo é definido por:

$$\frac{dV}{dt} = I(t) - Q(t,V). \quad (4)$$

O volume V do reservatório relaciona-se com I e Q através de uma função de armazenamento empírica. Em escoamentos não-permanentes através de reservatórios que não são excessivamente longos e em que os hidrogramas de entrada não variam abruptamente com o tempo a equação pode ser solucionada assumindo-se a hipótese de que a superfície do reservatório é horizontal.

Neste trabalho a equação (4) foi solucionada através de um método iterativo de integração, Fread, (1992), com a aplicação da regra do trapézio. Considerando-se que $dV=S(h)dh$, onde h é o nível de água no reservatório e $S(h)$ é a área da superfície do reservatório correspondente ao nível de água h (ver Figura 3), a equação (4) pode ser reescrita como:

$$S \frac{dh}{dt} = I(t) - Q(t,h). \quad (5)$$

Integrando-se a equação (5) e aplicando-se a regra do trapézio num intervalo de tempo finito Δt , resulta:

$$\frac{(S_j + S_{j+1})(h_{j+1} - h_j)}{2\Delta t} - \frac{I_j + I_{j+1} - (Q_j + Q_{j+1})}{2} = 0. \quad (6)$$

Os índices j e $j+1$, que surgem nas variáveis da equação (6) indicam os valores para os instantes do início e do final do intervalo de tempo, respectivamente. As variáveis desconhecidas na equação (6) são: h , Q e S , no instante $j+1$. A equação (6) pode ser solucionada pelo método iterativo de Newton-Raphson:

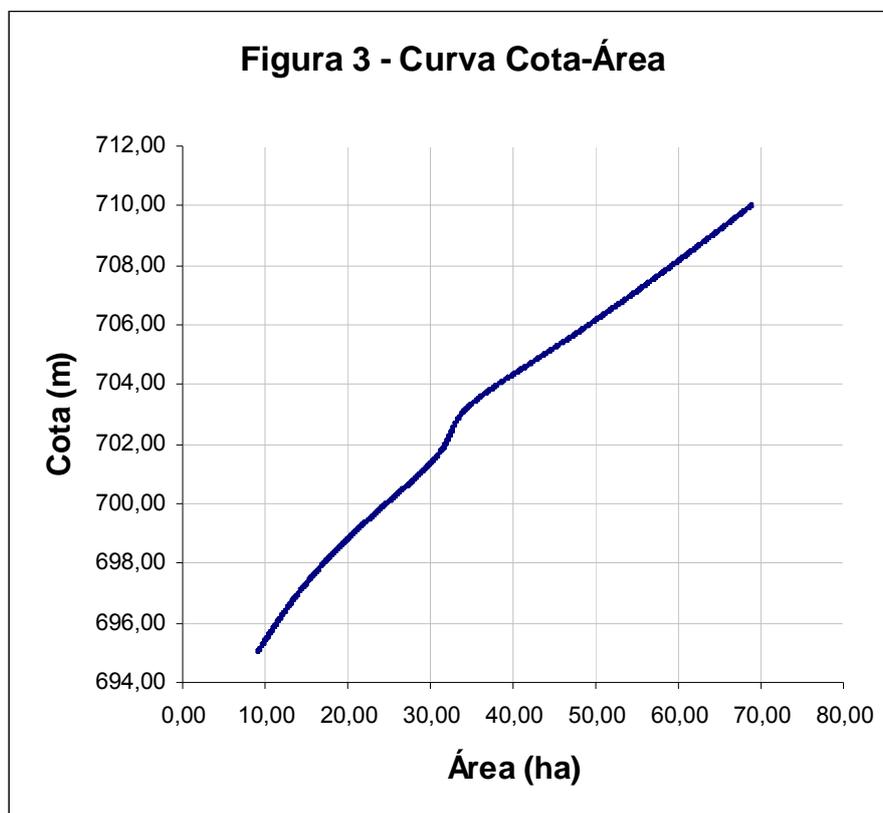
$$h_{j+1}^{k+1} = h_{j+1}^k - \frac{f(h_{j+1}^k)}{f'(h_{j+1}^k)}, \quad (7)$$

Onde k é índice da iteração e a função $f(h)$ é igual ao lado esquerdo da equação (6).

Na equação (7), $f'(h)$ representa a derivada da função $f(h)$ em relação a variável h . Esta derivada pode ser aproximada numericamente usando-se a seguinte expressão:

$$f'(h) = \frac{f(h + \varepsilon) - f(h - \varepsilon)}{2\varepsilon}, \quad (8)$$

sendo ε um pequeno valor, em geral adotado como igual a 0,02 m.



RESULTADOS

Os resultados provenientes da propagação da onda de cheia pelo reservatório (Lago Cascavel-PR) estão resumidos na Tabela 3 a seqüência, onde é mostrada a grande capacidade de amortecimento oferecida pelo lago. O resultado deve-se às características das enchentes urbanas, geralmente de grande magnitude no pico de vazão e de pequeno volume escoado, associadas, no caso, à grande dimensão do reservatório com área do espelho de água significativa frente à área da

bacia de drenagem, garantindo grande capacidade de armazenamento. Um exemplo gráfico destes resultados é apresentado nas Figuras 4a, 4b, 4c e 4d a seguir, salientando-se que o mesmo aspecto dos hidrogramas afluentes e defluentes é observado para todos os casos analisados.

Uma análise expedita sobre o hidrograma afluente que produziria uma vazão máxima defluente, correspondente à capacidade do vertedor considerada a cota 705m, mostra que o risco de ocorrência seria inferior ao definido para um tempo de recorrência de 10.000 anos, critério usualmente adotado para a construção de grandes barragens.

Tabela 3 - Resumo - Amortecimento de Cheia

Método Hu ($\Delta t = 0,93\text{min}$)		Vazão Máxima Afluente		Vazão Máxima Efluente			Método Hu ($\Delta t = 1,53\text{min}$)		Vazão Máxima Afluente		Vazão Máxima Efluente		
Coef. Escoam ^{to}	TR(cm)	Q (m ² /s)	t (min)	Q (m ² /s)	t (min)	NAR (m)	Coef. Escoam ^{to}	TR(cm)	Q (m ² /s)	t (min)	Q (m ² /s)	t (min)	NAR (m)
C = 0,80	10,00	242,91	9,33	15,48	23,85	703,45	C = 0,80	10,00	190,73	13,75	16,00	31,40	703,46
	25,00	276,41	9,33	18,42	23,75	703,52		25,00	217,04	13,75	19,02	31,23	703,53
	50,00	304,79	9,33	21,01	23,68	703,57		50,00	239,32	13,75	21,68	31,11	703,58
C = 0,52	10,00	157,89	9,33	8,68	24,15	703,29	C = 0,52	10,00	123,98	13,75	8,99	31,87	703,30
	25,00	179,67	9,33	10,32	24,07	703,33		25,00	141,07	13,75	10,68	31,74	703,34
	50,00	198,12	9,33	11,77	23,99	703,37		50,00	155,56	13,75	12,18	31,63	703,38

**Figura 4a. - Propagação de Cheia em Reservatório
HU(Dt=1,53min) - Tr = 10 anos - C = 0,80**

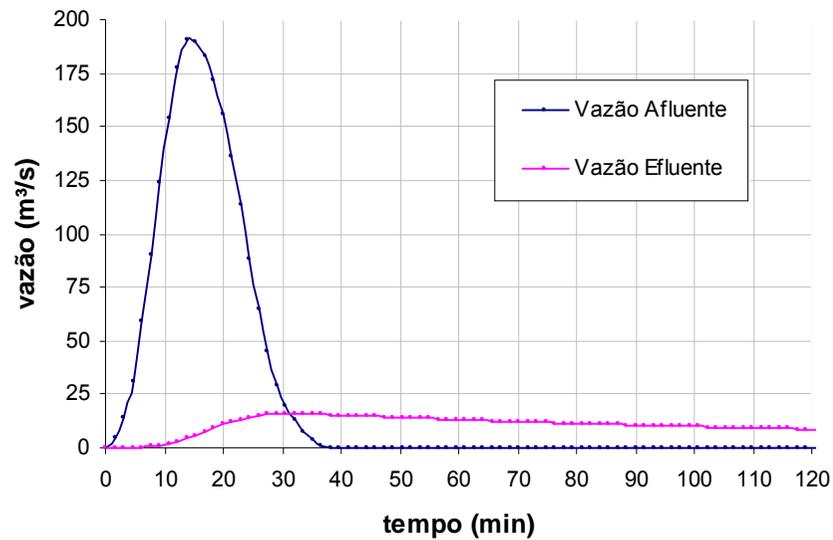


Figura 4b - Propagação de Cheia em Reservatório
HU(Dt=0,93min) - Tr = 10 anos - C = 0,80

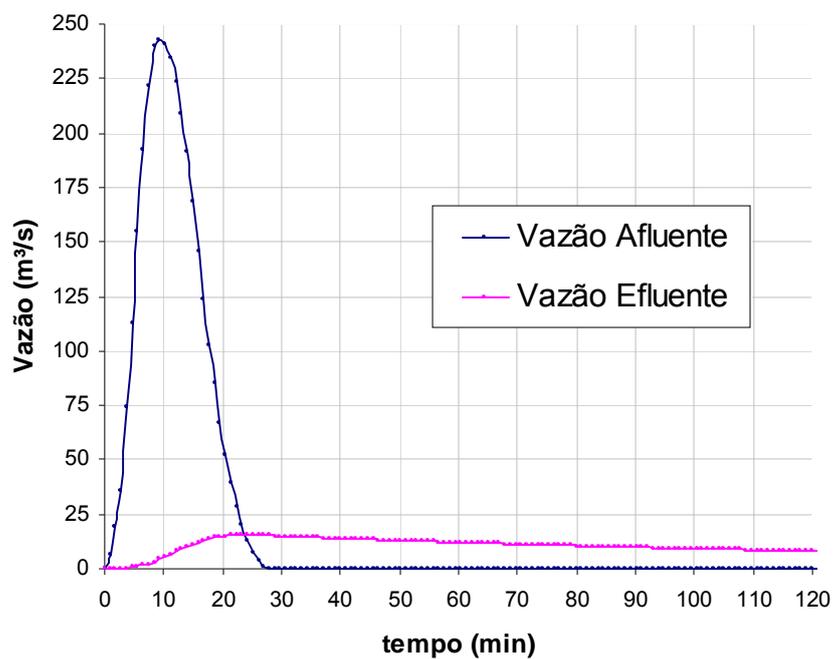
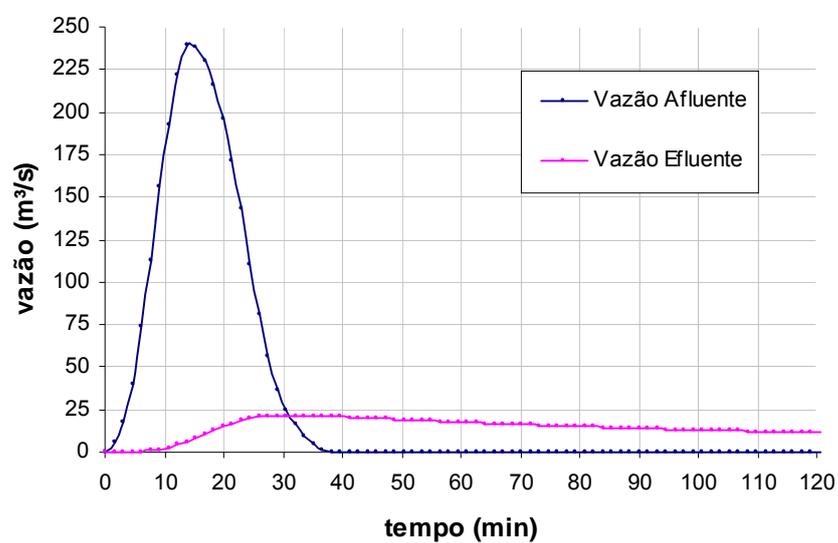
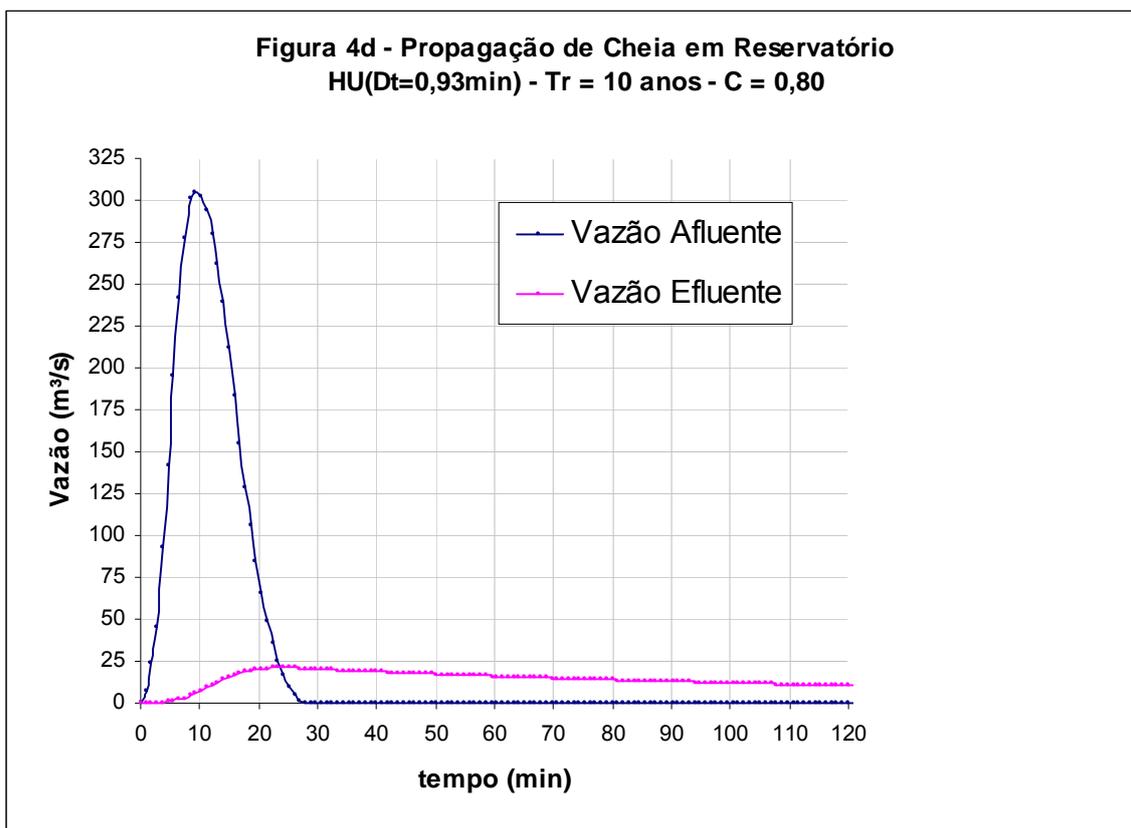


Figura 4c. - Propagação de Cheia em Reservatório
HU(Dt=1,53min) - Tr = 50 anos - C = 0,80





BIBLIOGRAFIA

- FREAD, D.L. (1992). "Flow Routing", in: *Handbook of Hydrology*. Ed. McGraw-Hill.
- GOMIDE, F.L.S.; BRAGA, M.T.A. (1979). *Projeto HG-46 – Vazão de Dimensionamento de Obras de Drenagem Superficial na Região Paranaense da Serra do Mar*. CEHPAR, Curitiba.
- LENCASTRE, A. (1972). *Manual de Hidráulica Geral*. Ed. Edgard Blücher, S.Paulo.
- PILGRIM, D.H.; CORDERY, I. (1992). "Flood Runoff", in *Handbook of Hydrology*. Ed. McGraw-Hill.
- PINTO, N.L.S. (1987). *Hidráulica Aplicada*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.