

# MEDIDOR DE VAZÃO DE ESGOTOS PALMER-BOWLUS

Eng.º RUSSELL G. LUDWIG \*

Na revista SANEAMENTO, no seu número de Abril/Dezembro de 1971 (ref. 5), o Engenheiro Paulo Naidin analisou o medidor Palmer-Bowlus, apresentou modificações no projeto da calha do medidor e fez sugestões para simplificar os cálculos da curva energética da calha usando uma garganta de seção retangular.

Durante os anos de 1946 a 1950, este autor foi Engenheiro Sanitarista de Los Angeles County Sanitation Districts, Los Angeles, California (LACSD) e trabalhou sob a direta supervisão do finado Dr. Harold K. Palmer e do finado Dr. Fred D. Bowlus, os quais, em conjunto, desenvolveram o instrumento medidor que agora leva os seus nomes. Com a experiência adquirida com esta associação, além da experiência obtida com a própria execução de projetos e instalação de várias centenas de tais calhas de todos os diâmetros e formas, este autor acredita que uma elaboração e análises mais detalhadas do trabalho apresentado pelo Engenheiro Naidin, podem acentuar ainda mais as possibilidades de utilização deste simples e efetivo instrumento de medição no Brasil.

## CONSIDERAÇÕES GERAIS

No projeto de um medidor de vazão de esgotos é necessário prover uma combinação de elementos hidráulicos, incluindo forma e tamanho da garganta, o nível da base da garganta e o diâmetro do conduto a montante, os quais de fato permitem, dentro da variação desejada, a medição da vazão de esgotos sob consideração,

sem se importar com os cálculos, os quais podem estar implícitos. Para condutos circulares, em certos casos onde a vazão máxima a ser medida não é mais que aproximadamente sessenta por cento da capacidade normal do tubo a montante, uma seção retangular da garganta servirá para o propósito. No entanto, na maioria dos casos, o engenheiro descobrirá durante o seu trabalho de desenvolvimento do projeto mais adequado do medidor, que a seção retangular não servirá para medir adequadamente vazões com uma certa variação, e ainda, se fosse utilizada, seria necessário prover um tubo maior na seção do conduto de esgoto a montante do medidor.

Foi por esta importante razão, que Palmer & Bowlus (Ref. 1) utilizaram a seção trapezoidal, já que a mesma permite a medição de vazões de grandes variações, além de em circunstâncias normais, poder ser instalada sem aumentar o diâmetro a montante, o qual, por suposto, é obrigatório quando se instalar em redes existentes.

Selecionando uma base de largura adequada e rampas laterais, o engenheiro pode projetar medidores os quais serão adequados para medir as variações de vazões pretendidas e ainda medirão com aceitável grau de exatidão os valores de baixas vazões.

Deve ser enfatizado que o engenheiro quando projetar um medidor Palmer-Bowlus, deve dar devida consideração às condições hidráulicas do conduto sob consideração. Um determinado tamanho de garganta quando instalada no tubo de um determinado diâmetro servirá para medir uma vazão máxima fixa. Se o tubo de um certo diâmetro foi assentado com um gradiente relativamente pronunciado, pode tornar impraticável a instalação de um medidor dentro do tubo para medir as vazões máximas, devido a que a

\* Diretor-Presidente da ENCIBRA S. A. — Engenheiros Consultores, São Paulo — Brasil.

contração da garganta pode causar uma sobrecarga a montante, a qual não somente distorcerá as medições mas também é indesejável por razões de manutenção da linha. Em tais casos, sem importar-se com a forma da garganta, será necessário incrementar o diâmetro do tubo a montante. Além disso, onde as vazões a montante estão perto ou acima da fase crítica, atenção particular deve ser dada quando da escolha de uma garganta a fim de que o salto hidráulico ocorra suficientemente longe, a montante, para assegurar uma corrente tranquila no ponto de medição, justamente um pouco acima da contração, para facilitar a repetição da vazão crítica na garganta do medidor.

A habilidade de ser capaz de desenvolver uma curva energética mediante a aplicação de princípios de hidráulica é a maior vantagem do medidor Palmer-Bowlus sobre o comumente utilizado medidor Parshall. Através da aplicação da equação de Bernoulli (equacionamento da energia a montante e na garganta) o projetista estará em condições de elaborar uma curva energética para quaisquer tipos de garganta e poderá projetar um medidor apropriado para quaisquer conjuntos de vazões. Outrossim, no medidor Palmer-Bowlus, o ponto de medição de carga está localizado acima da seção de transição a montante, numa zona onde a profundidade da vazão não sofre variações significativas numa extensão de aproximadamente um diâmetro. Portanto, apesar de ser recomendada que a medição seja feita num ponto não maior que 0,5 D acima da entrada da seção de transição, a localização não é crítica. Outrossim, após a construção do medidor, é possível medir a seção da garganta e modificar a curva energética a fim de adaptá-la se necessário, às condições de «como construído».

Em contraste, o medidor Parshall é um instrumento experimental de medição, o qual não pode ser analisado por princípios hidráulicos. As medições da carga são feitas dentro da seção de transição de montante, em algum ponto ao longo da superfície declinante da água, onde uma queda de 10 a 15 por cento já aconteceu. Por estas razões, durante a construção do medidor Parshall, todas as dimensões devem ser observadas rigorosamente e o ponto de medição de carga deve estar no ponto preciso do experimento original. O projetista não tem outro recurso se o medidor não foi construído exatamente tal e como projetado.

Tal como acontece no caso do medidor Parshall, o medidor Palmer-Bowlus deverá estar localizado de tal maneira que turbulência significativa ou ondas não aconteçam no ponto de medição da carga. Por exemplo, um medidor não

deve estar localizado imediatamente após a junção de uma curva ou de uma válvula de entrada.

#### **CÁLCULO DA CURVA ENERGÉTICA DO MEDIDOR PALMER-BOWLUS**

Os cálculos necessários para determinar a curva energética de uma garganta de seção trapezoidal (ou qualquer outra seção) não representam um trabalho muito extensivo. A curva energética é desenvolvida tomando-se várias profundidades críticas da garganta, computando a velocidade da vazão, a quantidade e a energia total para cada uma das profundidades e após determinando a combinação de profundidade e velocidade na seção a montante, a qual produz a mesma energia total para cada conjunto de informações. Apesar de vários métodos poderem ser utilizados, este autor achou que a determinação de profundidade a montante pelo método de «tentativa e erro» é o procedimento mais simples.

Os cálculos para determinação da seção da garganta são diretos e não oferecem dificuldades. A velocidade é calculada usando a equação geral para a vazão crítica:

$$V_c^2/2g = A/2B$$

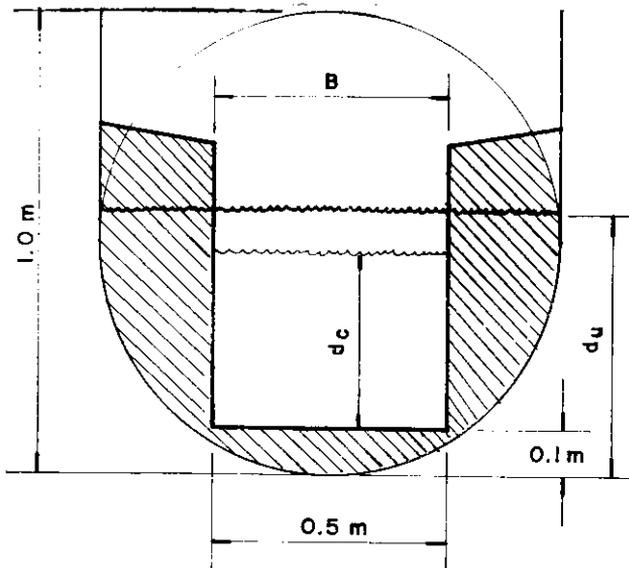
onde:

«A» é a área da vazão; e

«B» é a parte superior da largura da seção da vazão.

Os cálculos da profundidade a montante são mais facilmente feitos, estimando-se primeiramente o valor da velocidade da carga a montante, o qual normalmente representa somente 3 a 10 por cento da energia total nas variações de vazões usualmente encontradas. Com uma, ou no máximo duas correções após a tentativa inicial, os valores apropriados serão estabelecidos. Também, se o projetista determinar primeiramente os valores da velocidade da carga para a mais baixa e a mais alta das vazões, os valores intermediários podem ser determinados de perto na primeira tentativa. Para condutos circulares, os cálculos da área de montante são facilitados usando-se tabelas completas das áreas parciais até a profundidade de 1/2 conduto diâmetro. Cálculos para a área a montante para profundidade maiores que 1/2 tubo diâmetro estão baseados em uma seção em forma de «U».

A vantagem na execução de tais cálculos para obter-se a curva energética é que o proje-



**TABELA I**

**SEÇÃO DE GARGANTA RETANGULAR**

- dc = Profundidade crítica na garganta
- Vc = Velocidade na garganta
- hc = Carga de velocidade na garganta
- B = Largura na crista
- A = Área da seção da vazão
- E = Energia total sôbre a geratriz do tubo
- du = Profundidade a montante
- hu = Carga da velocidade a montante

**SEÇÃO DA GARGANTA**

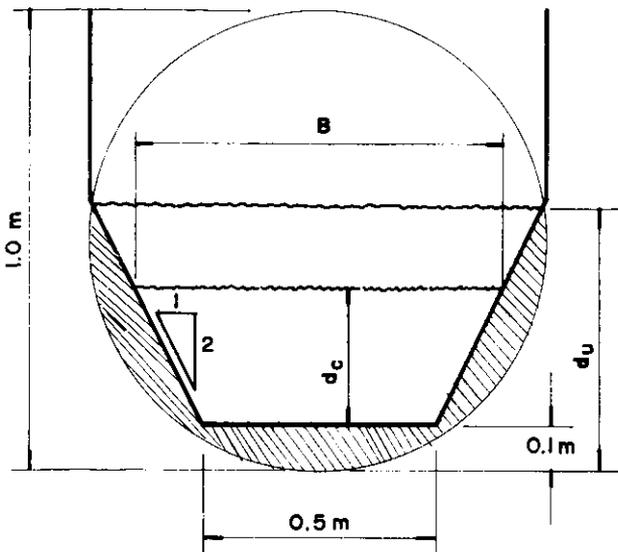
dc	B	Ac	hc = = A/2B	Vc = = $\sqrt{2ghc}$	Q = = Ac · Vc	E = = (dc + hc + 0.1)
0.1	0.5	0.05	.05	0.9905	.0495	0.25
0.2	0.5	0.10	.10	1.401	.1401	0.40
0.3	0.5	0.15	.15	1.716	.2574	0.55
0.4	0.5	0.20	.20	1.981	.3962	0.70
0.5	0.5	0.25	.25	2.215	.5538	0.85
0.6	0.5	0.30	.30	2.427	.7281	1.00

**SEÇÃO A MONTANTE EM FORMA DE "U"**

Q (DA TABELA ACIMA)	E (DA TABELA ACIMA)	du **	Au *	Vu Q / Au	hu ** Vu <sup>2</sup> / 2g	Eu du + hu
.0495	0.25	.244	.1483	.334	.006	.250
.1401	0.40	.387	.2807	.499	.013	.400
.2574	0.55	.531	.4237	.608	.019	.550
.3962	0.70	.675	.5677	.698	.025	.700
.5538	0.85	.819	.7117	.778	.031	.850
.7281	1.00	.963	.8577	.849	.037	1.000

\* CALCULADA USANDO AS TABELAS PARA ÁREAS PARCIAIS DOS CÍRCULOS ATÉ D/2.

\*\* PRIMEIRAMENTE ESTIMADO E DEPOIS CORRIGIDO POR TENTATIVA E ERRO.



**TABELA 2**

**SEÇÃO DE GARGANTA TRAPEZOIDAL**

- dc = Profundidade crítica na garganta
- Vc = Velocidade na garganta
- hc = Carga de velocidade na garganta
- B = Largura na crista
- A = Área da seção da vazão
- E = Energia total sobre a geratriz do tubo
- du = Profundidade a montante
- hu = Carga da velocidade a montante

**SEÇÃO DA GARGANTA**

dc	B	Ac	hc = = A/2B	Vc = = $\sqrt{2ghc}$	Q = = Ac · Vc	E = = (dc + hc + 0.1)
0.1	0.6	.055	.0458	0.948	.0521	.2458
0.2	0.7	.120	.0857	1.297	.1556	.3857
0.3	0.8	.195	.1219	1.546	.3015	.5219
0.4	0.9	.280	.1556	1.747	.4892	.6556
0.5	1.0	.375	.1875	1.918	.7193	.7875
0.6	1.0*	.475	.2375	2.159	1.0255	.9375

\* LARGURA MÁXIMA DO CANAL.

**SEÇÃO A MONTANTE EM FORMA DE "U"**

Q (DA TABELA ACIMA)	E ACIMA)	du	Au	Vu Q / Au	hu Vu <sup>2</sup> / 2g	Eu du + hu
.0521	.246	.239	.1441	.362	.007	.246
.1556	.386	.368	.2623	.593	.018	.386
.3015	.522	.490	.3827	.788	.032	.522
.4892	.656	.607	.4997	.979	.049	.656
.7193	.788	.717	.6097	1.180	.071	.788
1.0255	.938	.837	.7297	1.405	.101	.938

tista se familiariza com o aspecto total das informações que concernem ao medidor, incluindo as variações das velocidades a montante, as quais podem ser um fator de controle.

As Tabelas 1 e 2 mostram projetos hipotéticos para o medidor Palmer-Bowlus nas duas versões: retangular e trapezoidal, a serem instalados num conduto com as seguintes características:

Diâmetro do conduto, D .....	1.0 m
Gradiente, s .....	.002
Fator de fricção, n .....	.013
Capacidade (conduto cheio), Q ..	1.07 m <sup>3</sup> /s

O nível do fundo de cada um dos medidores propostos foi indicado como sendo 0,1 m (D/10) acima da cota da geratriz inferior do tubo. A garganta trapezoidal tem declives laterais de 2 a 1. Cada seção tem uma largura de fundo de 0,5 m, a qual é aproximadamente a dimensão máxima praticável para uma calha colocada D/10 acima da cota da geratriz inferior do tubo.

A figura 1 é a elaboração das duas curvas energéticas resultantes e também inclui a curva de vazão/profundidade para vazão normal no tubo acima da instalação do medidor. A curva claramente indica que:

(1) O medidor Palmer-Bowlus trapezoidal proverá medições de vazões adequadas para virtualmente a capacidade total normal do conduto.

(2) A seção retangular medirá adequadamente somente sessenta por cento, aproximadamente, da capacidade total do tubo.

### CURVAS ENERGÉTICAS PARA SEÇÕES TRAPEZOIDAIS STANDARD

Dados sobre a curva energética para duas seções trapezoidais standard do medidor Palmer-Bowlus estão mostrados na Tabela 3.

Cada seção tem declives laterais de 2 a 1 e um levantamento na elevação da base da calha de 1/10 de diâmetro do tubo (D). As larguras da base selecionadas foram de D/2 e D/3.

É possível preparar tais tabelas porque tendo as seções os mesmos declives laterais e onde a largura da base e o levantamento da elevação da base tem relação com o diâmetro do tubo, a vazão resultante está em função de D<sup>5/2</sup>.

Os valores indicados nas tabelas para as duas seções da calha precisam somente serem multiplicados por D<sup>5/2</sup> a fim de converter os valores da vazão atual de esgotos por quaisquer diâmetros dados do tubo, «D».

Muitas das necessidades de medição podem ser perfeitamente satisfeitas utilizando uma das seções tabuladas. Quando condições particulares decorrentes de problemas de medição demandam uma seção especial, a curva energética pode ser elaborada utilizando o método acima descrito.

Em qualquer caso, o projetista pode procurar as condições de vazão crítica como anteriormente mencionado.

### MEDIDOR RETANGULAR PALMER-BOWLUS EM CONDUTOS CIRCULARES

Para uma seção retangular instalada dentro de um condutor circular, usando a nomenclatura mostrada na figura (1), a equação geral de Bernoulli pode ser escrita como segue:

$$d_c + V_c^2/2g = d_u - t + V_u^2/2g$$

Quando a vazão é de profundidade crítica no canal retangular,

$$d_c + V_c^2/2g = 3/2 d_c \text{ e } d_c = (q^2/g)^{1/3}$$

A equação de Bernoulli pode portanto, ser escrita como segue:

$$q = (8g/27)^{1/2} (d_u - t + V_u^2/2g)^{3/2}$$

e introduzindo a largura da calha «B», a fórmula apresenta-se:

$$Q = 1.705 B (d_u - t + V_u^2/2g)^{3/2} \quad (1)$$

A equação do Engenheiro Paulo Naidin (Ref. 5, pág. 62), é expressa em unidades métricas como segue:

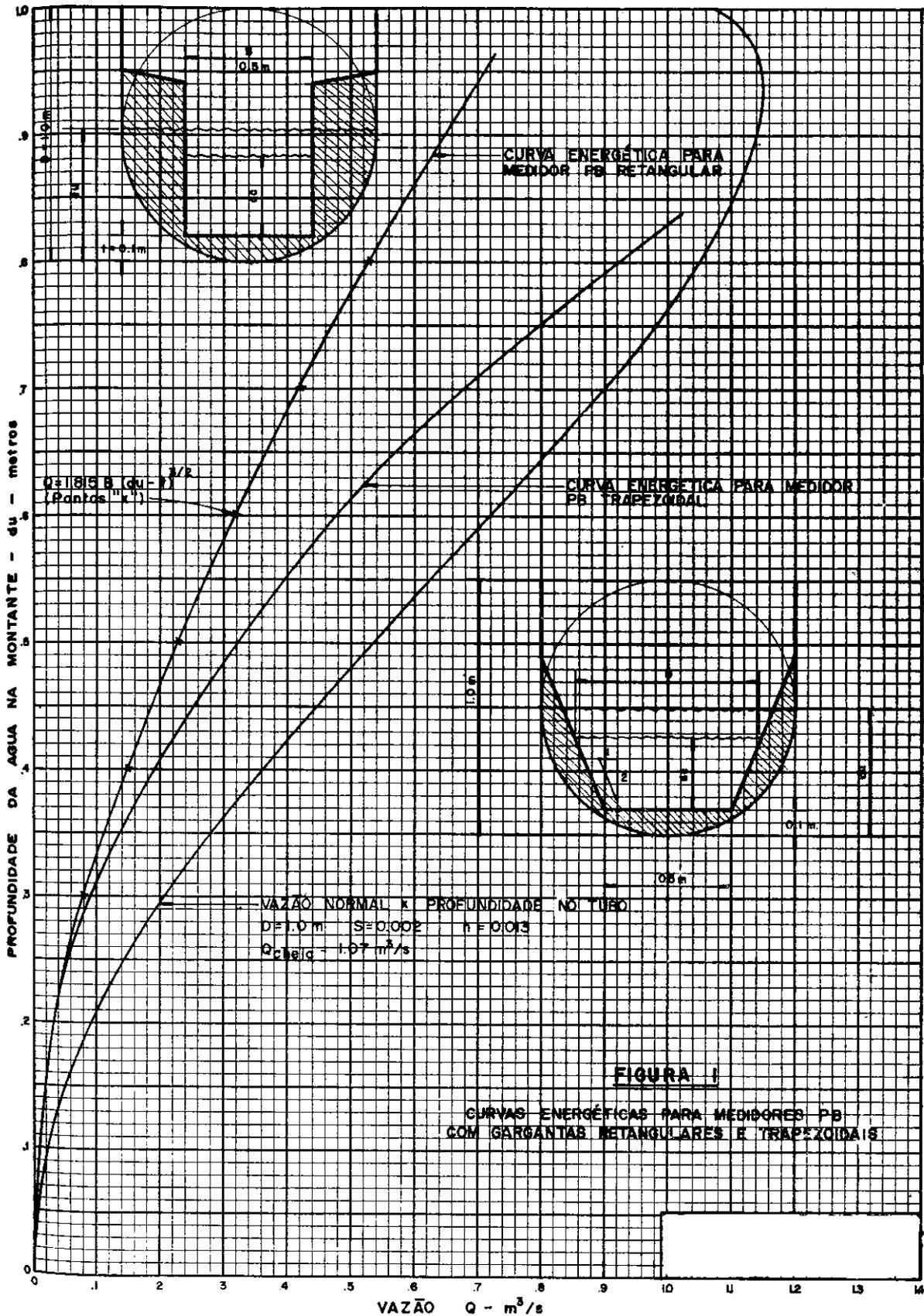
$$Q = 1.624 B (d_u - t + 1.1 q^2/2gd_u^2)^{3/2} \quad (2)$$

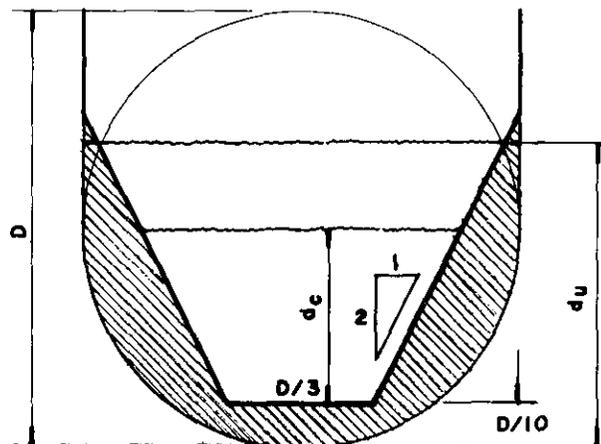
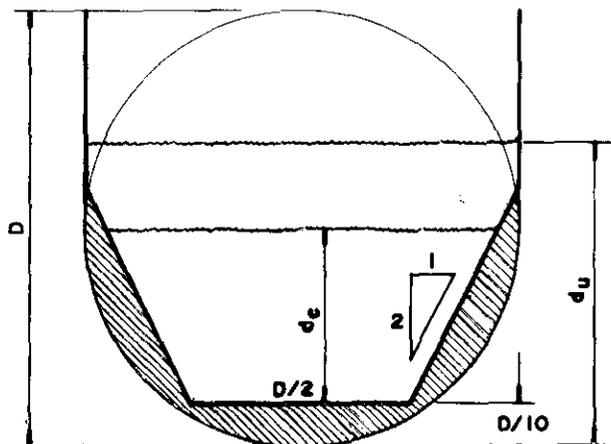
A diferença entre a equação (1) e (2) é decorrente de duas causas, do fator 1/10 (V<sub>c</sub><sup>2</sup>/2g - V<sub>u</sub><sup>2</sup>/2g) introduzido na equação geral de Bernoulli para as perdas de transição como também para a substituição da expressão V<sub>u</sub> = q/d<sub>u</sub> em lugar da velocidade a montante.

Por exemplo, se a equação (1) é revisada para incluir somente a margem de 1/10 (V<sub>c</sub><sup>2</sup>/2g - V<sub>u</sub><sup>2</sup>/2g) para as perdas de transição na montante, a equação apresenta-se:

$$Q = 1.624 B (d_u - t + 1.1 V_u^2/2g)^{3/2} \quad (3)$$

De outro lado, se a equação (1) é revisada para incluir somente a substituição da expressão



**TABELA 3**DADOS PARA A CURVA ENERGÉTICA PARA MEDIDORES PB TRAPEZOIDAL STANDARD.

$du/D$	$Q/D^{5/2}$	$Q$ em $m^{3/s}$ $D$ em $m$	$du/D$	$Q/D^{5/2}$
.15	.0101		.15	.0068
.20	.0305		.20	.0204
.25	.0590		.25	.0395
.30	.0950		.30	.0640
.35	.1384		.35	.0940
.40	.1894		.40	.1296
.45	.2482		.45	.1710
.50	.3153		.50	.2186
.55	.3913		.55	.2726
.60	.4770		.60	.3336
.65	.5732		.65	.4019
.70	.6810		.70	.4779
.75	.8004		.75	.5623
.80	.9274		.80	.6557
.85	1.0614		.85	.7587
.90	1.2022		.90	.8723

$V_u = q/d_u$ , em lugar da velocidade a montante, a fórmula apresenta-se:

$$Q = 1.705 B (d_u - t + q^2/2gd_u^2)^{3/2} \quad (4)$$

Profundidades versus curva de vazão foi preparada para o medidor retangular Palmer-Bowlus do Engenheiro Naidin (Ref. 5, pág. 67) usando todas as quatro fórmulas, as quais são mostradas na figura (2). Os cálculos para as equações (1) e (3) foram desenvolvidos pelo procedimento da curva energética previamente explicada e que estão mostradas na Tabela (4). Os valores da equação (2) são aqueles de Naidin, tomados do Quadro I (ref. 5, pág. 64) mas multiplicados por um fator de 3,02 para converter a vazão total na garganta de 0,92 m (3,02 pés) de largura. Cálculos para a equação (4) foram determinados pelo procedimento de tentativa e erro. As observações seguintes podem ser feitas a partir da figura (2).

(a) até um valor de profundidade a montante de aproximadamente 0,4 m não afetam significativamente os resultados.

(b) No entanto, valores superiores a  $d_u = 0,4$  m, as curvas das fórmulas (2), (3) e (4) divergem da curva da equação básica de Bernoulli, fórmula (1), como segue:

(1) Fórmula (3), a qual inclui somente a margem de  $1/10 (h_c - h_u)$  para perdas de transição produz valores a partir de 4 a 5 por cento a menos que a Fórmula (1).

(2) Fórmula (4), a qual inclui somente a substituição da expressão  $V_u = q/d_u$  para velocidades a montante produz valores de vazão a partir de 5 a 16 por cento a mais que na Fórmula (1).

(3) Fórmula (2), a fórmula de Naidin, a qual inclui margens para as duas perdas de transição e a substituição para a velocidade a montante, produz valores de 1 a 11 por cento a mais que na Fórmula (1).

O valor  $1/10 (h_c - h_u)$  é comumente utilizado como margem de segurança para as perdas de carga resultante da transição, onde a vazão de fluxo é contraída. No entanto, para a boa execução de um projeto da entrada da transição, a perda é possivelmente muito menor que  $0,05 (h_c - h_u)$  (Ref. 6, pág. 8-32), e em muitos casos a perda de carga é tão pequena que pode ser ignorada (Ref. 6, pág. 8-15).

Algumas aproximações foram feitas nas derivações teóricas da curva energética para a calha Palmer-Bowlus e estão sumarizadas por Wells & Gotaas (Ref. 4). No entanto, a magnitude da soma de todos os efeitos das aproximações sobre a certeza da medição de vazão foi determinada

por Wells & Gotaas como sendo inferior a 3 por cento. Este fato, o qual foi resultado de extensivos testes de laboratório de muitos medidores de todos os tamanhos e formas, confirmou as conclusões teóricas originais do Dr. Harold K. Palmer, o qual executou as análises hidráulicas originais para o medidor. Sendo que a vazão de esgotos varia consideravelmente de dia a dia e de hora a hora, uma medição com possibilidade de erro de somente 3 por cento é considerada bem dentro dos limites necessários de exatidão. Portanto, a questão de perda de energia no medidor Palmer-Bowlus é normalmente ignorada e os cálculos são feitos nas bases de equacionamento dos valores da energia do fluxo na montante e na garganta da calha.

A análise indica que certamente a maior distorção é causada pela indicação de que  $V_u = q/d_u$ . Visto que «q» é a vazão por unidade de largura da garganta e não por unidade de largura da seção a montante, esta expressão é incorreta e introduz erro significativo. Streeter (Ref. 7, pág. 622) usa a citada substituição mas os seus cálculos são para canais retangulares de largura constante onde a substituição logicamente aplica-se. Na circunstância presente, tal substituição somente seria correta se a razão da largura a montante ( $B_u$ ) para a largura da garganta ( $B_T$ ) fosse incluída, isto é,  $V_u = (B_T/B_u) (q/d_u)$ . No caso particular em questão, quando a profundidade a montante é um metro, a carga real da velocidade é 0,025 m, enquanto que a indicação de  $q^2/2gd_u^2$  dá um valor de 0,105 m.

Pelas razões acima expostas, acreditamos ser aconselhável basear os cálculos das calhas Palmer-Bowlus, na equação de Bernoulli:

$$d_c + V_c^2/2g = d_u - t + V_u^2/2g$$

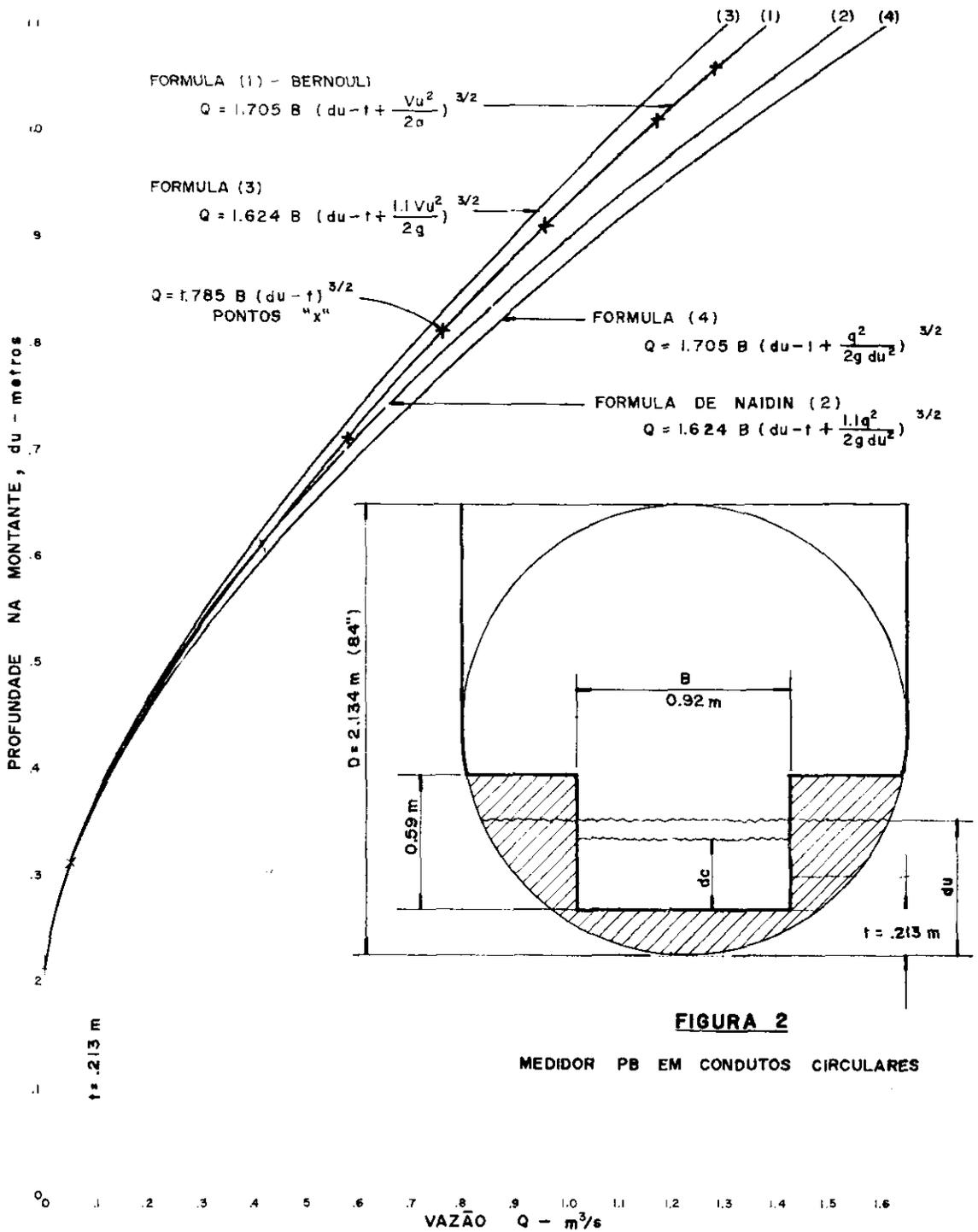
ou

$$Q = 1,705 B (d_u - t + V_u^2/2g)^{3/2}$$

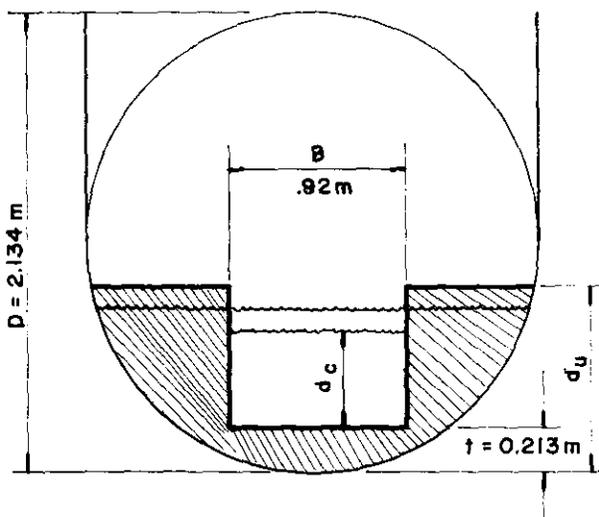
sem a inclusão da compensação para perdas de transição e sem a indicação de que a velocidade na montante é igual a vazão por unidade de largura da garganta dividida pela profundidade na montante.

#### FÓRMULA SIMPLIFICADA PARA MEDIDORES PALMER-BOWLUS RETANGULARES EM CONDUTOS CIRCULARES

Resultante de uma vasta experiência em projetos além de uso constante de medidores Palmer-Bowlus, este autor desenvolveu um método simplificado para calcular em vazões para medidores de seção retangular instalados em condutos circulares.







**TABELA 4**

CALCULO DA CURVA ENERGETICA PARA MEDIDORES PB DO ENG<sup>2</sup> NAIDIN (REF. 5, Pag. 67) Figura 6

$$\text{FORMULA (1)} \quad E = d_c + \frac{V_c^2}{2g} + t = du + \frac{Vu^2}{2g}$$

$$\text{FORMULA (3)} \quad E' = d_c + \frac{1.1 V_c^2}{2g} + t = du + \frac{1.1 Vu^2}{2g}$$

**GARGANTA**

dc	Ac	Vc <sup>2</sup> /2g=dc/2	Vc	Qc	E	E'
0.1	.092	.05	.990	.0911	.363	.368
0.2	.184	.10	1.401	.2578	.513	.523
0.3	.276	.15	1.716	.4736	.663	.678
0.4	.368	.20	1.981	.7290	.813	.833
0.5	.460	.25	2.215	1.0189	.963	.988
0.59	.5428	.295	2.406	1.3060	1.098	1.1275

**CALCULOS DA MONTANTE - FORMULA (1)**

Q	E	du	Au	Vu	hu= Vu <sup>2</sup> /2g
.0911	.363	.3603	.3991	.2282	.0027
.2578	.513	.5049	.6469	.3985	.0081
.4736	.663	.6495	.9209	.5143	.0135
.7290	.813	.7946	1.2136	.6007	.0184
1.0189	.963	.9400	1.5178	.6713	.0230
1.3060	1.098	1.0711	1.7971	.7267	.0269

**CALCULOS DA MONTANTE - FORMULA (3)**

Q	E	du	Au	V	hu	1.1hu
.0911	.368	.3652	.4069	.2239	.0026	.0028
.2578	.523	.5145	.6642	.3881	.0077	.0085
.4736	.678	.6640	.9494	.4988	.0127	.0140
.7290	.833	.8140	1.2537	.5815	.0172	.0190
1.0189	.988	.9643	1.5696	.6491	.0215	.0237
1.3060	1.1275	1.1000	1.8587	.7026	.0250	.0275

E equação geral de vazão é:

$$Q = CB (d_{ii} - t)^{3/2}$$

onde:

- Q = Vazão de esgotos em m<sup>3</sup>/s  
C = Coeficiente de vazão  
d<sub>ii</sub> = Profundidade da vazão na montante  
t = Elevação do fundo da seção do medidor acima da geratriz inferior do tubo  
D = Diâmetro do tubo  
B<sub>T</sub> = Largura da garganta retangular

É possível a utilização desta fórmula simplificada para medidores de seção de garganta retangular devido à limitada **variação** que o efeito da carga da velocidade na montante tem sobre os cálculos. A razão  $(d_{ii} - t)/(d_{ii} - t + V_{ii}^2/2g)$  é quase constante através da variedade de vazões envolvidas. Portanto, somente é necessário um ajustamento no coeficiente de vazão para permitir o uso da fórmula modificada.

O coeficiente «C» depende da razão do diâmetro do tubo para largura da garganta, D/B<sub>T</sub> e da razão da elevação do fundo da seção para o diâmetro do tubo t/D.

A figura (3) é uma curva dando os valores do coeficiente de vazão «C» para medidores retangulares instalados em condutos circulares para valores D/B<sub>T</sub> na faixa de 2,0 a 4,0 e para um valor t/D de 1/10. Valores de vazão calculados usando os coeficientes da curva não variarão mais que 2% dos valores determinados por equacionamento da energia na garganta e na montante.

Curvas similares poderiam ser desenvolvidas para outros valores de t/D. No entanto, tendo-se em consideração razões tanto teóricas quanto práticas, este autor acredita que D/10 representa o valor desejável da elevação do fundo da seção do medidor Palmer-Bowlus instalado em condutos circulares.

Para ilustrar a simplicidade de desenvolvimento de fórmulas de vazão para tais medidores retangulares Palmer-Bowlus, referência é feita de (a) medidor retangular incluído por este autor na Figura (1) e (b) da calha retangular do Engenheiro Naidin mostrada na Figura (2).

(a) Medidor Retangular de Russel G. Ludwig:

- Diâmetro do tubo, D = 1,00 m  
Largura da garganta, B<sub>T</sub> = 0,5 m e D/B<sub>T</sub> = 2,0  
Elevação do fundo, t = 0,1 m e t/D = 1/10

Na curva da Figura (3), o coeficiente de vazão «C» é 1,815 e a fórmula de vazão é representada:

$$Q = 1,815 B_T (d_{ii} - t)^{3/2}$$

ou

$$Q = 0,9075 (d_{ii} - 0,1)^{3/2}$$

Valores calculados usando esta fórmula foram sobrepostos na curva energética previamente calculada para esta calha e estão mostrados na Figura (1) indicados com um «x». Deve-se notar que os pontos coincidem com a curva original.

(b) Medidor Retangular de Naidin:

- Diâmetro do tubo, D = 2,134 m  
Largura da garganta, B<sub>T</sub> = 0,92 m e D/B<sub>T</sub> = 2,32  
Elevação do fundo, t = 0,213 m e t/d = 1/10

Na curva da Figura (3) o coeficiente de vazão «C» é 1,785, portanto a fórmula é representada:

$$Q = 1,785 B_T (d_{ii} - t)^{3/2}$$

ou

$$Q = 1,642 (d_{ii} - 0,213)^{3/2}$$

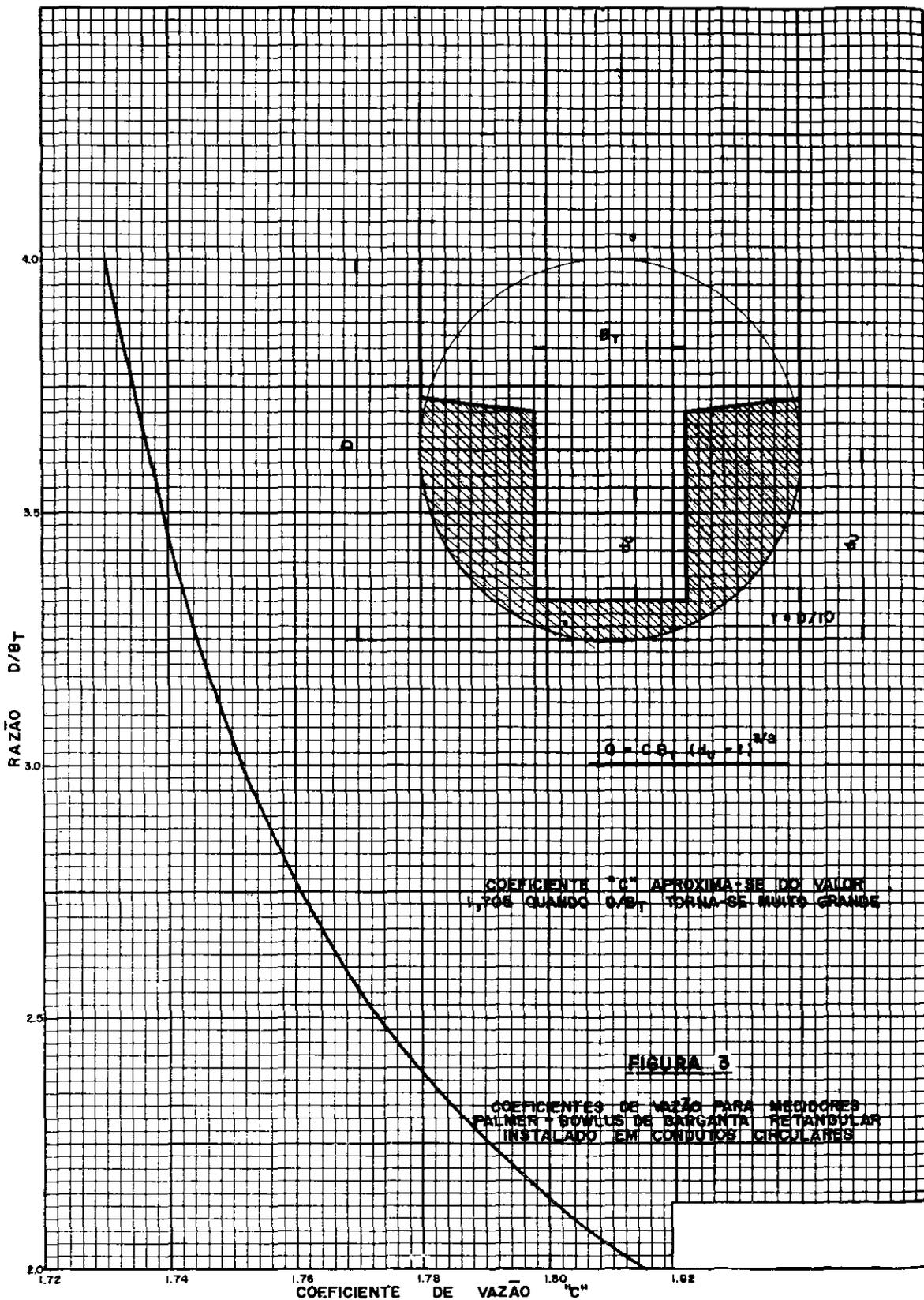
Valores calculados usando esta fórmula foram igualmente sobrepostos a curva previamente calculada para esta calha e estão mostrados na Figura (2) com um «x». Mais uma vez chama-se a atenção ao fato de que estes pontos coincidem com os da curva original.

#### **MEDIDORES PALMER-BOWLUS RETANGULARES EM CANAIS RETANGULARES**

Medidores Palmer-Bowlus com garganta de seção retangular, com ou sem qualquer elevação no fundo da garganta, podem ser convenientemente instalados em canais retangulares na entrada de elevatórias ou de estações de tratamento. De fato, uma das instalações originais de Palmer & Bowlus foi colocada no canal do afluente final da estação de tratamento original do LACSD.

Um procedimento simples também existe para calcular curvas energéticas de tais medidores, o qual mais uma vez é baseado na fórmula geral seguinte:

$$Q = CB_T (d_{ii} - t)^{3/2}$$



onde:

- $Q$  = Vazão de esgotos em  $m^3/s$   
 $C$  = Coeficiente de vazão  
 $d_u$  = Profundidade da vazão na montante  
 $t$  = Elevação do fundo da seção do medidor acima do canal  
 $B_T$  = Largura da garganta  
 $B_u$  = Largura do canal na montante  
 $d_c$  = Profundidade crítica na garganta  
 $\tilde{R}$  = Razão  $B_u/B_T$   
 $x$  = Razão  $d_c/d_u$

O valor do coeficiente de vazão, «C», é dependente da razão da largura do canal na montante para a largura da garganta ( $R = B_u/B_T$ ) e para o valor da derivação do fundo «t». A Figura (4) apresenta coeficientes de vazão para a faixa de valores de «R» de 2,0 a 4,0 e para valores de «t» de 0,0 m, 0,05 m e 0,10 m.

Para o caso de «t» = 0,0 os valores mostrados para o coeficiente de vazão «C» são exatos e podem ser determinados para qualquer valor de «R», partindo-se das seguintes fórmulas, as quais foram desenvolvidas por este autor, após uma sugestão feita por Linford (Ref. 2), isto é:

Primeiramente, com o valor dado de «R» determinar o valor de «x» a partir da equação:

$$x^3 = R^2 (3x - 2)$$

Em seguida, calcular o coeficiente de vazão «C» a partir da equação:

$$C = (gx^3)^{1/2}$$

Para os casos de «t» = 0,05 e «t» = 0,10 m, os dados de vazão calculados usando os coeficientes, estarão dentro de 2% dos valores determinados por equacionamento da energia na garganta e na montante para a faixa de  $B_u$  (0,5 – 1,5 m) e  $d_u$  até 1,0 m), como mostrado na Figura (4).

É interessante notar que os coeficientes de vazão para o caso de «t» = 0 estão muito perto daqueles de garganta de seção retangular instalada dentro de condutos circulares, com uma elevação do fundo igual a  $D/10$  (Figura 3) para valores  $B_u/B_T$  correspondendo a esses de  $D/B_T$ . Isto acontece devido a que, excetuando para profundidades muito pequenas onde o efeito da carga da velocidade a montante é insignificante em qualquer caso, a elevação de fundo de  $0,1D$  numa seção circular resulta em áreas na montante, quase exatamente iguais àquelas de um canal retangular sem a elevação.

Os medidores Palmer-Bowlus poderão também ser projetados para canais retangulares de largura constante, utilizando-se somente uma elevação na base da seção de controle. No entanto, para tais projetos, uma elevação relativamente grande é necessária para assegurar uma boa operação do medidor. Por esta razão, acredita-se que um projeto mais adequado resultará usando uma garganta de seção contrita com ou sem elevação de fundo, tal como descrito nos parágrafos precedentes.

## RESUMO

(1) A maioria das aplicações do medidor Palmer-Bowlus para a medição de vazões de esgotos precisam de garganta de seção trapezoidal a fim de permitir medição de vazões dentro da faixa especificada sem que se aumente o diâmetro do tubo a montante.

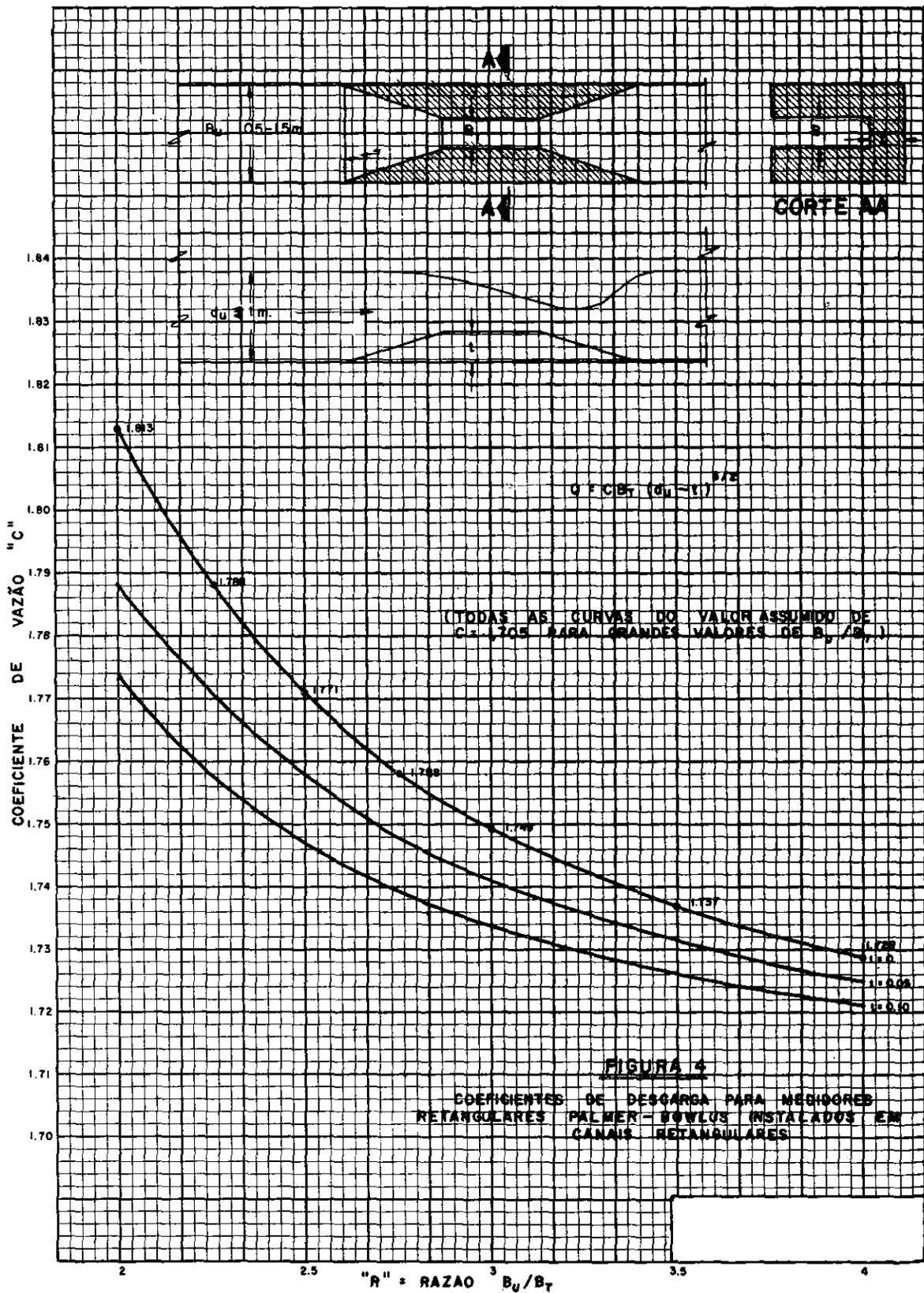
(2) Em certos casos, devido a diâmetro e declividade do conduto, é necessário, de todas as maneiras, aumentar o diâmetro do tubo a montante para permitir a medição de vazões dentro da faixa necessária.

(3) Quando a profundidade normal da vazão no conduto é igual ou menor que a profundidade crítica para a vazão a ser medida, a garganta deve ser cuidadosamente selecionada a fim de que o salto hidráulico ocorra suficientemente longe a montante para assegurar um fluxo tranquilo no ponto de medição.

(4) A preparação da curva energética de uma calha para uma garganta de seção trapezoidal (ou para qualquer outra garganta) não é um tarefa complicada já que a mesma pode ser feita pelo procedimento de tentativa e erro, tal como explicada anteriormente.

(5) A maioria das necessidades para medição de vazões de esgotos podem ser preenchidas pelo uso de uma seção trapezoidal de forma «standard». Tabelas de coeficientes de vazões foram incluídas por este autor no presente trabalho para duas seções «standard». Os coeficientes só precisam ser multiplicados por  $D^{5/2}$  para determinar valores de vazão para os valores tabulados de  $d_u/D$ .

(6) Para medidores retangulares Palmer-Bowlus em condutos circulares a indicação de que a velocidade a montante é igual à vazão por unidade de largura da seção da garganta dividido pela profundidade a montante é causa de grandes erros na relação de profundidade/vazão e **não** deve ser usada.



**FIGURA 4**  
 COEFICIENTES DE DESGARGA PARA MEDIÓDRES  
 RETANGULARES PALMER-BOWLUS (INSTALADOS EM  
 CANAIS RETANGULARES)

TABELA (5)

COEFICIENTES PARA ÁREAS PARCIAIS DOS CÍRCULOS

A = Cd<sup>2</sup>      d = diâmetro

D/d	VALOR DE "C"									
	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
.10	.04088	.04148	.04209	.04270	.04330	.04391	.04453	.04515	.04577	.04639
.11	.04701	.04764	.04827	.04890	.04953	.05017	.05081	.05145	.05210	.05274
.12	.05339	.05405	.05470	.05536	.05601	.05667	.05734	.05800	.05867	.05933
.13	.06000	.06068	.06136	.06203	.06271	.06339	.06408	.06476	.06545	.06615
.14	.06684	.06754	.06824	.06893	.06963	.07033	.07104	.07175	.07246	.07317
.15	.07388	.07460	.07531	.07603	.07675	.07748	.07820	.07893	.07966	.08039
.16	.08112	.08185	.08259	.08332	.08406	.08481	.08555	.08629	.08704	.08779
.17	.08854	.08929	.09005	.09081	.09156	.09232	.09308	.09384	.09460	.09537
.18	.09614	.09691	.09768	.09845	.09922	.10000	.10078	.10156	.10234	.10312
.19	.10390	.10469	.10548	.10627	.10706	.10785	.10865	.10944	.11024	.11103
.20	.11183	.11263	.11344	.11424	.11505	.11585	.11666	.11747	.11828	.11909
.21	.11990	.12072	.12154	.12236	.12317	.12399	.12482	.12564	.12647	.12729
.22	.12812	.12895	.12978	.13061	.13144	.13228	.13311	.13395	.13479	.13563
.23	.13647	.13731	.13816	.13900	.13985	.14069	.14154	.14240	.14325	.14410
.24	.14495	.14581	.14666	.14752	.14838	.14923	.15010	.15096	.15182	.15269
.25	.15355	.15442	.15528	.15615	.15702	.15789	.15877	.15964	.16052	.16139
.26	.16227	.16315	.16403	.16491	.16579	.16667	.16755	.16844	.16932	.17021

D/d	VALOR DE "C"									
	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
.27	.17109	.17198	.17287	.17376	.17465	.17554	.17644	.17734	.17823	.17913
.28	.18002	.18092	.18182	.18272	.18362	.18452	.18543	.18633	.18724	.18814
.29	.18905	.18996	.19087	.19178	.19269	.19360	.19451	.19543	.19634	.19726
.30	.19817	.19909	.20001	.20092	.20184	.20276	.20369	.20461	.20553	.20645
.31	.20738	.20830	.20923	.21016	.21109	.21201	.21295	.21388	.21481	.21574
.32	.21667	.21760	.21854	.21947	.22041	.22134	.22228	.22322	.22416	.22510
.33	.22604	.22698	.22792	.22886	.22980	.23075	.23169	.23264	.23358	.23453
.34	.23547	.23642	.23737	.23832	.23927	.24022	.24117	.24212	.24308	.24403
.35	.24498	.24594	.24689	.24785	.24880	.24976	.25072	.25168	.25264	.25359
.36	.25455	.25551	.25647	.25744	.25840	.25936	.26032	.26129	.26225	.26321
.37	.26418	.26515	.26611	.26708	.26805	.26902	.26998	.27095	.27192	.27289
.38	.27386	.27483	.27581	.27678	.27775	.27872	.27970	.28067	.28164	.28262
.39	.28359	.28457	.28555	.28652	.28750	.28848	.28945	.29043	.29141	.29239
.40	.29337	.29435	.29533	.29631	.29729	.29827	.29926	.30024	.30122	.30221
.41	.30319	.30417	.30516	.30614	.30713	.30811	.30910	.31008	.31107	.31206
.42	.31304	.31403	.31502	.31601	.31699	.31798	.31897	.31996	.32095	.32194
.43	.32293	.32392	.32491	.32590	.32689	.32788	.32888	.32987	.33086	.33185
.44	.33284	.33384	.33483	.33582	.33682	.33781	.33880	.33980	.34079	.34179
.45	.34278	.34378	.34477	.34577	.34676	.34776	.34876	.34975	.35075	.35175
.46	.35274	.35374	.35474	.35573	.35673	.35773	.35873	.35972	.36072	.36172
.47	.36272	.36372	.36471	.36571	.36671	.36771	.36871	.36971	.37071	.37170
.48	.37270	.37370	.37470	.37570	.37670	.37770	.37870	.37970	.38070	.38170
.49	.38270	.38370	.38470	.38570	.38670	.38770	.38870	.38970	.39070	.39170
.50	.39270									

(7) Testes extensivos de laboratório do instrumento de medição Palmer-Bowlus demonstraram de forma conclusiva que as vazões calculadas admitindo que a energia total na seção da garganta é igual a energia total a montante, não varia mais que 3% dos volumes realmente medidos. Cálculos das curvas energéticas ou das fórmulas de vazão para medidores Palmer-Bowlus deverão bascar-se na fórmula geral de Bernoulli:

$$d_v + V_v^2/2g + t = d_u + V_u^2/2g$$

ou

$$Q = (8g/27)^{1/2} B (d_u - t + V_u^2/2g)^{3/2}$$

sem adicionar-se compensação por perdas de transição, etc.

(8) Onde gargantas de seção retangular podem ser utilizadas, ou dentro de canais retangulares ou dentro de condutos circulares, equações simples podem ser facilmente formuladas pelo uso da equação geral de vazão:

$$Q = CB_T (d_u - t)^{3/2}$$

com valores do coeficiente «C» apresentados neste trabalho pelo autor.

#### AGRADECIMENTOS

O autor deseja reconhecer a cooperação oferecida por várias entidades em tornar possível

trazer esta informação à atenção dos profissionais da Engenharia.

O presente artigo é o resultado de dados colhidos para um curso abreviado, patrocinado através de um programa conjunto do BNH, ABES e USAID/Brasil.

#### BIBLIOGRAFIA

1. PALMER, Harold K. and BOWLUS, Fred D. — Adaptation of Venturi Flumes to Flow Measurements in Conduits, Transactions, ASCE, Vol. 101, 1195 (1936).
2. LINFORD, A. — Flow Measurement and Meters, E. & F. N. Spon Ltd., 22 Henrietta St., WC 2, London 1949.
3. LUDWIG, John H. and LUDWIG, Russell G. — Design of Palmer-Bowlus Flumes, Sewage and Industrial Wastes, Vol. 23, No. 9, September 1951.
4. WELLS, Edwin A. & Gotaas, Harold B. — Design of Palmer-Bowlus Flumes in Circular Conduits, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, No. SA 2, April, 1956.
5. NAIDIN, Paulo — Medidor Palmer-Bowlus, Modificado — Revista SANEAMENTO, Rio de Janeiro, N.º 42, Abril/Dezembro 1971.
6. KING, Horace W. & BRATER, Ernest F. — «Hand book of Hydraulics». Mc Graw-Hill Book Company, New York, N. Y.
7. STREETER, Victor L. — «Fluid Mechanics, Fifth Ed.», Mc Graw-Hill Book Company, New York, N. Y., 1971.