REVISTA DIGITAL ACADÊMICO MUNDO

CALIBRAÇÃO DE UMA CALHA PARSHALL

CALIBRATION OF A PARSHALL FLUME

CALIBRACIÓN DE UN CANAL PARSHALL

10.56238/ramv20n16-015

Weslley Imperiano Gomes de Melo
Doutor em Engenharia Civil e Ambiental
Instituição: Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
E-mail: drweslleygomesdemelo@gmail.com; weslley.gomes@ufrpe.br

Ronildo Inácio Soares de Alencar
Mestre em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
E-mail: ronildo49@yahoo.com.br

Hamilcar José Almeida Filgueira
Doutor em Recursos Naturais
Instituição: Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
E-mail: hfilgueira@gmail.com

Tarciso Cabral da Silva
Doutor em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
E-mail: tarcisocabral@gmail.com

RESUMO
Este trabalho destina-se a conferir a equação que rege a vazão que passa em uma calha Parshall de garganta de 2", pois as calhas padronizadas estão normatizadas a partir de garganta 3", sendo motivo este o de se conferir a conformidade do fenômeno com a fórmula matemática obtida dos dados disponíveis na calha pelo fabricante através de uma escala a 2/3 a montante da garganta com uma resolução de $\pm\ 2{,}5\ m^3/h$. Além de calibrar esta calha pretende-se melhora a resolução desta escala para $\pm\ 0{,}5\ m^3/h$.

Palavras-chave: Calha Parshall. Calibração. Canal Aberto. Sifão Invertido. Vazão.

ABSTRACT
This study aims to verify the equation governing the flow rate through a 2-inch-throat Parshall flume, since standard flumes are typically based on a 3-inch throat. The purpose is to verify the agreement of the observed flow with the mathematical formula derived from the data provided by the manufacturer, using a 2/3-scale flume upstream of the throat with a resolution of $2{,}5\ m^3/h$. In addition to calibrating this flume, the goal is to improve the resolution of this scale to $\pm\ 0{,}5\ m^3/h$.

Keywords: Parshall Flume. Calibration. Open Channel. Inverted Siphon. Flow Rate.

RESUMEN
Este trabajo tiene como objetivo verificar la ecuación que rige el caudal en un canal Parshall con garganta de 2", dado que los canales estandarizados se estandarizan a partir de una garganta de 3". El propósito es comprobar la concordancia del fenómeno con la fórmula matemática obtenida a partir de los datos del fabricante del canal, utilizando una escala a 2/3 aguas arriba de la garganta con una resolución de ± 2,5 m³/h. Además de calibrar este canal, se pretende mejorar la resolución de dicha escala a ± 0,5 m³/h.

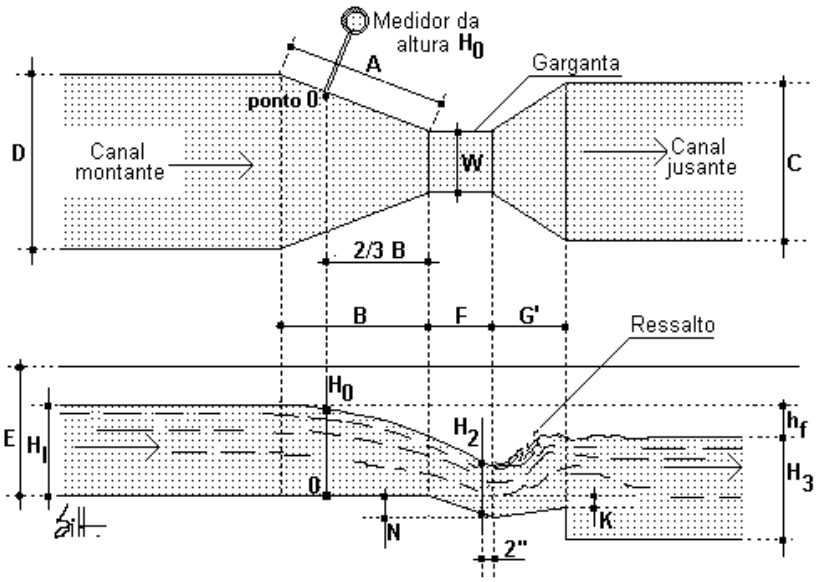
Palabras clave: Canal Parshall. Calibración. Canal Abierto. Sifón Invertido. Caudal.

1 INTRODUÇÃO

Medidor Parshall, *vertedor parshall ou calha parshall*, inventado pelo engenheiro americano do Serviço de Irrigação do Departamento de Agricultura dos Estados unidos, *Ralph Leroy Parshall* (1881-1960), que o criou com base nos estudos de Venturi. É um dispositivo de medição de vazão na forma de um canal aberto com dimensões padronizados.

A água é forçada por uma garganta relativamente estreita, sendo que o nível da água à montante da garganta é o indicativo da vazão a ser medida, independendo do nível da água à jusante de tal garganta. Vide Figura 1.

Figura 1 – Esquema de uma calha Parshall convencional



Fonte: Fenômenos da engenharia (2026).

O objetivo deste artigo é apresentar a calibrar de uma calha Parshall através do método volumétrico de medir vazão.

E ainda verificar se a curva que descreve a vazão que atravessa a calha Parshall em função da altura lâmina de água distando 2/3 a montante da garganta confere com a equação obtida através de dados existentes na calha em forma de escala.

A metodologia empregada consiste em adaptar um canal de vidro com quatro metros de comprimento, fazendo-se reduções da seção do canal para a seção de entrada e saída da calha Parshall de garganta W = 2”.

Sendo a redução em forma de prisma triangular nas paredes e no desnível, visando minimizar as perdas e as turbulências, as reduções das paredes a montante da calha com inclinação de 3,81º, as reduções das paredes a jusante da calha com inclinação de 5,71º e a inclinação de ambas as rampas de 1,43º.

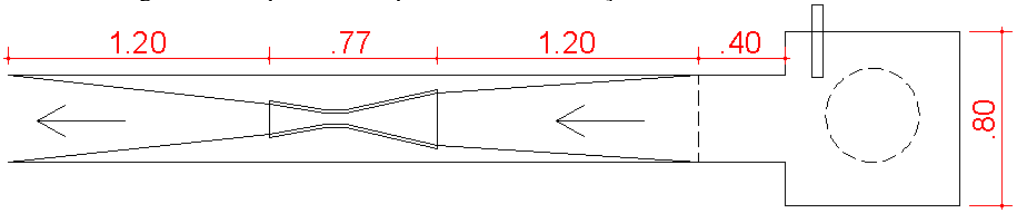
ISSN: 2318-1494

Ademais, administra-se a vazão que passará na calha através da entrada de água no sistema por uma tubulação que verte no recipiente amortecedor, sendo o controle fino desta vazão realizado por meio de sifão que remove água a uma vazão constante e regulável deste recipiente, construído com tubo de PVC de 50 mm.

Quando a água atravessa a calha e chega ao fim do canal é captada em um recipiente de volume determinado, medindo-se também o tempo gasto para preencher determinada parte do recipiente, da divisão do volume coletado pelo tempo decorrido obtêm-se a vazão Q.

Sempre em conformidade com o esquema experimental apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Esquema da experiência de calibração de uma calha Parshall



Fonte: Autores.

A montagem e realização da experiência tiveram as etapas apresentadas da Figura 3 até a Figura 11. Sempre em respeito às diretrizes de Fox et al. (2006), Streeter e Wylie (1982).

Figura 3 – Foto da Calha Parshall calibrada



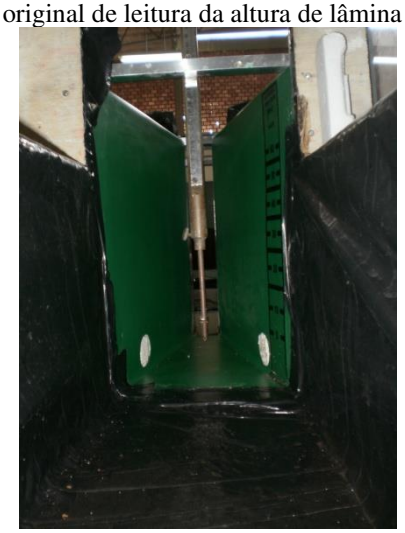
Fonte: Autores.

Figura 4 – Foto da extremidade do canal de ensaio



Fonte: Autores.

Figura 5 – Foto da escala original de leitura da altura de lâmina de água na Calha Parshall



Fonte: Autores.

Figura 6 – Foto da leitura da lâmina de água a 2/3 da garganta, na Calha Parshall



Fonte: Autores.

Figura 7 – Foto da seção de coleta de água para determinar a vazão no canal de ensaio



Fonte: Autores.

Figura 8 – Foto do sifão invertido utilizado para refinar o procedimento



Fonte: Autores.

Figura 9 – Foto do extremo final do sifão invertido utilizado no refinamento do procedimento



Fonte: Autores.

Figura 10 – Foto lateral do Canal à montante da Calha Parshall



Fonte: Autores.

Figura 11 – Foto da redução da largura do Canal de ensaio para acomodar a Calha Parshall, posicionada à montante da calha em comento



Fonte: Autores.

2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA NA MEDIÇÃO DO VOLUME DO RECIPIENTE UTILIZADO PARA DETERMINAR A VAZÃO QUE ATRAVESSA A CALHA

Através do método do cálculo da incerteza por uma única medição, disposto em Spiegel (1976), considerando-se todos os instrumentos calibrados, podendo afirmar que os erros sistemáticos são desprezíveis e que a incerteza na medição será a metade da menor divisão da escala do instrumento, ficando:

$$Medição_{Real} = Medição \pm \frac{d_{min}}{2} \quad (1)$$

Sendo u a representação das incertezas relativas:

$$u = \pm \frac{\frac{d_{min}}{2}}{Medição} \quad (2)$$

Na análise da propagação dessas incertezas consideraremos R o resultado que se deseja obter com o experimento, assim podemos afirmar que:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3)$$

Sendo $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ variáveis que determinam o resultado R, tem-se que a incerteza no resultado será função das incertezas das variáveis determinantes:

$$\delta_{R_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i}\,\delta_{x_i} \tag{4}$$

Onde: δ_{R_i} – Variação no resultado

$\frac{\partial R}{\partial x_i}$ - Variação do resultado em função de x_i

δ_{x_i} – Variação na abscissa x_i

A variação relativa em R, será:

$$\frac{\partial R_i}{R} = \frac{1}{R}\frac{\partial R}{\partial x_i}\delta_{x_i} = \frac{x_i}{R}\frac{\partial R}{\partial x_i}\frac{\delta_{x_i}}{x_i} \tag{5}$$

Usam-se u_{R_i} e u_{x_i} para variação relativa em R e em x, respectivamente.

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R}\frac{\partial R}{\partial x_i}u_{x_i} \tag{6}$$

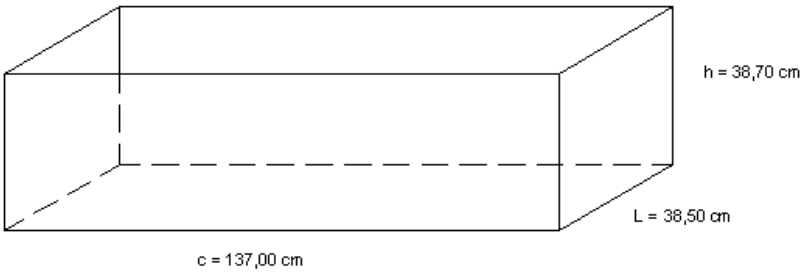
Pode-se determinar a incerteza no resultado R, através da associação das incertezas do resultados causada por cada variável, pela fórmula:

$$u_R = \pm\sqrt{\left(\frac{x_1}{R}\frac{\partial R}{\partial x_1}u_1\right)^2 + \left(\frac{x_2}{R}\frac{\partial R}{\partial x_2}u_2\right)^2 + \ldots + \left(\frac{x_n}{R}\frac{\partial R}{\partial x_n}u_n\right)^2} \tag{7}$$

2.1 CÁLCULO DA INCERTEZA DO VOLUME

Na Figura 12 é apresentado o esquema do trecho do canal de ensaio sem a redução de seção. Cujo cálculo do volume implica em: $\forall = c\,.\,h\,.\,L \equiv 204.123{,}15\ cm^3 \equiv 204{,}12\ l$.

Figura 12 – Esquema do trecho do canal à montante da Calha Parshall e sem a redução da seção



Fonte: Autores.

Agora, utilizando-se uma régua de aço com resolução de $\pm\frac{0,1}{2}cm$. As incertezas relativas são:

i. Para o comprimento: $u_c = \pm\dfrac{\frac{0,10}{2}}{137,00} \equiv \pm 0,00036$;

ii. Para a altura: $u_h = \pm\dfrac{\frac{0,10}{2}}{38,70} \equiv \pm 0,0013$; e

iii. Para a largura: $u_L = \pm\dfrac{\frac{0,10}{2}}{38,50} \equiv \pm 0,0013$.

A propagação das incertezas relativas no volume será:

$$u_\forall = \pm\sqrt{\left(\frac{c}{\forall}\frac{\partial \forall}{\partial c}u_c\right)^2 + \left(\frac{L}{\forall}\frac{\partial \forall}{\partial L}u_L\right)^2 + \left(\frac{h}{\forall}\frac{\partial \forall}{\partial h}u_h\right)^2} = \pm\sqrt{{u_c}^2 + {u_L}^2 + {u_h}^2}$$

$$u_\forall = \pm\, 0,001873 = \pm\, 0,1873\ \%$$

Visto que:

$$\forall = c\,.\,h\,.\,L \quad \begin{cases} \dfrac{\partial \forall}{\partial c} = L\,.\,h \\ \dfrac{\partial \forall}{\partial L} = c\,.\,h \\ \dfrac{\partial \forall}{\partial h} = c\,.\,L \end{cases}$$

Em mililitros, tem-se: $u_\forall = \pm\, 382,40\ ml$.

2.2 ANÁLISE DA INCERTEZA NA VAZÃO

A vazão é função do volume captado num tempo decorrido, logo a incerteza na vazão será igual a combinação das incertezas relativas do volume e do tempo. Seja:

ISSN: 2318-1494

$$Q = \frac{\forall}{\Delta t}$$

A incerteza da vazão estimada será:

$$u_Q = \pm\sqrt{\left(\frac{\forall}{Q}\frac{\partial Q}{\partial \forall}u_{\forall}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{Q}\frac{\partial Q}{\partial \Delta t}u_{\Delta t}\right)^2}$$

Sendo:

$$\frac{\partial Q}{\partial \forall} = \frac{1}{\Delta t} \qquad \frac{\partial Q}{\partial \Delta t} = \frac{-2\forall}{\Delta t^2} \qquad u_{\forall} = \pm 0{,}001873$$

Para a determinação da máxima incerteza usaremos o menor tempo de coleta, pois a exatidão aumenta ao coletarmos o fluido por mais tempo e decresce a medida que este tempo decresce.

$$\Delta t_{Menor} = 21{,}16\ s \qquad u_{\Delta t} = \pm\frac{\frac{0{,}2\ s}{2}}{21{,}16\ s} = \pm\ 0{,}004726$$

Assim:

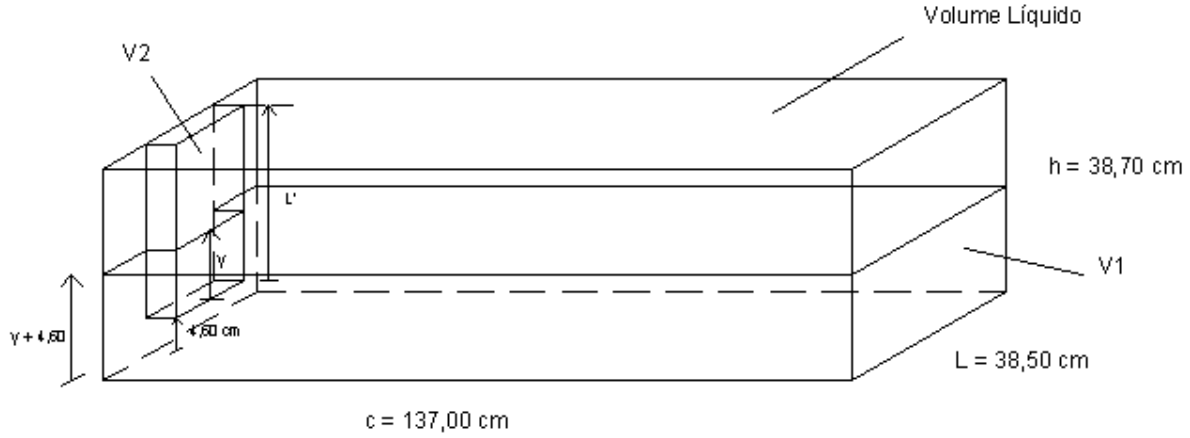
$$u_Q = \pm\sqrt{\left(\frac{\forall}{Q}\frac{\partial Q}{\partial \forall}u_{\forall}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{Q}\frac{\partial Q}{\partial \Delta t}u_{\Delta t}\right)^2} = \pm\sqrt{(u_{\forall})^2 + (2u_{\Delta t})^2}$$

$$u_Q = \pm\ 0{,}009636 = \pm\ 0{,}9636\ \%$$

2.3 VOLUME CAPTADO: VALOR CORRIGIDO

Na Figura 13 é apresentado o esquema de correção do volume captado, sempre em conformidade com o disposto na Figura 12.

Figura 13 – Esquema de correção do volume captado



Fonte: Autores.

$$\Delta Li = y + 4{,}60 \qquad L' = 38{,}70 - 4{,}60 = 34{,}10\ cm \qquad \forall_2 = (2{,}50\ .\ 28{,}00\ .\ 34{,}10).10^{-3} = 2{,}387\ l$$

$$\forall_1 = (38{,}50\ .\ 137{,}00.\ \Delta Li).10^{-3} - \frac{\forall_2\ .\ y}{L'}$$

Pode-se extrair o valor do volume líquido pela fórmula a seguir:

$$\forall_{Líquido} = \forall_{Total} - \forall_1 - \forall_2$$

$$\forall_{Líquido} = 204{,}12 - 5{,}2745\ .\ \Delta Li + 0{,}07y - 2{,}387$$

Conhecendo-se que $\Delta Li = y + 4{,}6$ temos:

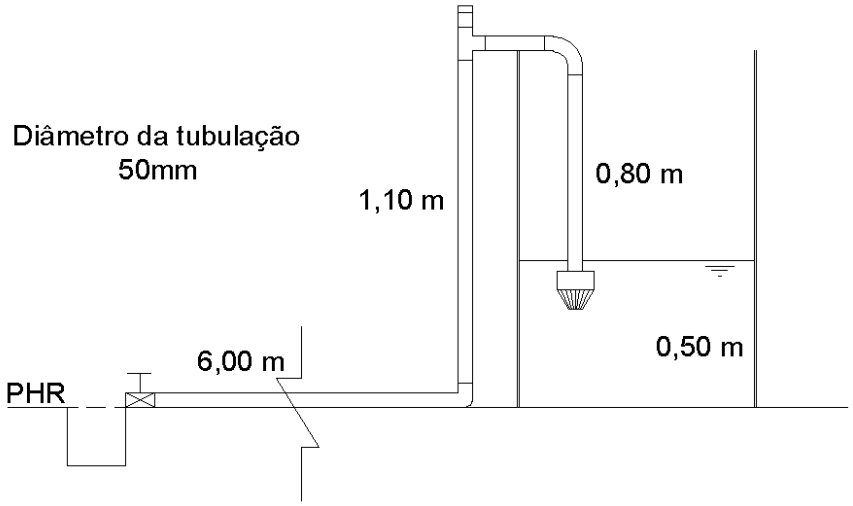
$$\forall_{Líquido} = 201{,}41 - 5{,}20\ .\ \Delta Li$$

Sendo $\Delta Li\ em\ cm$ e $\forall_{Líquido}$ em l.

3 DETERMINAÇÃO DA MÁXIMA VAZÃO QUE PASSA POR UM SIFÃO CONECTADO AO RESERVATÓRIO AMORTECEDOR DE TURBULÊNCIA

Na Figura 14 é apresentado o esquema e as dimensões do sifão invertido, com os seguintes comprimentos equivalentes das peças hidráulicas: **i.** 1,20 m para a curva de raio longo; **ii.** 7,30 m para o tê de saída bilateral; **iii.** 3,20 m para o Joelho de 90º; **iv.** 0,70 m para o Registro de gaveta aberto. Computando 12,40 metros de comprimento equivalente de tubulação, para o cálculo das perdas de carga.

Figura 14 – Esquema e dimensões do sifão invertido



Fonte: Autores.

Aplicando-se o ponto 1 no nível de água do reservatório amortecedor e o ponto 2 na seção de saída do sifão e empregando a equação de Bernoulli nestes dois pontos, tem-se:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{{V_1}^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{{V_2}^2}{2g} + Z_2 + hf_{1-2} \tag{8}$$

$$0{,}5 = \frac{{V_2}^2}{2g} + hf \quad \Leftrightarrow \quad hf = 0{,}5 - \frac{{V_2}^2}{2g}$$

Aplicando-se a equação de Darcy-Weisbach, tem-se:

$$hf = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \tag{9}$$

Substituindo-se a equação 8 na 9, obtém-se:

$$0{,}5 - \frac{V^2}{2g} = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \implies 0{,}5 = \left(1 + f\frac{L}{D}\right)\frac{V^2}{2g} \implies 0{,}5 = \left[1 + f\frac{(6 + 1{,}1 + 0{,}8 + 12{,}6)}{0{,}05}\right]$$

$$0{,}5 = (1 + 406f)\frac{V^2}{2g} \tag{10}$$

Arbitrando-se na equação 10 o valor de $f = 0{,}009$, obtém-se:

$$0{,}5 = (1 + 406\,.\,0{,}009)\frac{V^2}{2g} \implies V = 1{,}45\ m/s$$

Calculando-se o número de Reynolds:

$$R_e = \frac{VD\rho}{v} \tag{11}$$

Adotando-se $v = 10^{-6}\ {}^{m^2}/_{S}$ e $\rho = 980\ kg/m^3$, na equação 11, tem-se:

$$R_e = \frac{VD\rho}{v} \implies R_e = \frac{1{,}45\,.\,0{,}05\,.\,980}{10^{-6}} \implies R_e = 7{,}1\,.\,10^7$$

Utilizando-se a equação de Swamee-Jain, para tal a espessura do tubo de PVC $\varepsilon = 0{,}0015\ mm$, tem-se:

$$f = \frac{0{,}25}{\left\{log\left[\frac{\varepsilon/D}{3{,}7} + \frac{5{,}74}{R_e{}^{0{,}9}}\right]\right\}^2} \qquad \begin{matrix} 10^{-6} \le \varepsilon/D \le 10^{-2} \\ 5\,.10^3 \le R_e \le 10^8 \end{matrix} \tag{12}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0{,}0015}{50} = 0{,}00003$$

Pela proximidade do valor de f arbitrado e o calculado, diz-se que f convergiu e com a adoção de $f = 0{,}0097$.

Na equação 10, substituindo o valor de $f = 0{,}0097$, encontra-se:

$$0{,}5 = (1 + 406f)\frac{V^2}{2g} \implies V = 1{,}41\ m/s$$

Pela equação da continuidade, obtém-se a vazão:

$$Q = A\,V \tag{13}$$

$$Q = \frac{\pi D^2}{4}\,V^2 \implies Q = 9{,}97\ m^3/h$$

ISSN: 2318-1494

4 DADOS EXPERIMENTAIS PROCESSADOS

Na Tabela 1 são apresentados os dados obtidos experimentalmente. Sendo a segunda coluna o registro da lâmina de água a 2/3 a montante da garganta da calha e a terceira coluna a diferença de nível que ficava no recipiente coletor de volume de água que passava na calha, ou seja, o já descrito ΔLi.

Tabela 1 – Medidas realizadas na calha parshall e no recipiente volumétrico e sua equivalente vazão

MEDIDAS	LÂMINA D'ÁGUA (Hi) (CM)	DIFERENÇA DE NÍVEL (ΔLi) (cm)	VOLUME LÍQUIDO (l)	Δt (s)	VAZÃO (l/s)	VAZÃO (m³/h)
	19,40	3,60	182,67	21,16	8,63	31,08
1	19,20	3,20	184,76	21,71	8,51	30,64
	19,20	3,90	181,11	21,35	8,48	30,54
	17,30	2,20	189,96	25,60	7,42	26,71
2	17,30	3,60	182,67	24,66	7,41	26,67
	17,30	2,70	187,36	25,34	7,39	26,62
	15,10	0,00	201,41	33,56	6,00	21,60
3	15,10	4,90	175,91	30,34	5,80	20,87
	15,00	7,20	163,94	28,41	5,77	20,77
	14,50	5,65	172,01	30,31	5,67	20,43
4	14,40	4,70	176,95	33,53	5,28	19,00
	14,35	4,30	179,03	31,32	5,72	20,58
	13,60	4,00	180,59	34,91	5,17	18,62
5	13,60	4,70	176,95	34,72	5,10	18,35
	13,60	5,80	171,22	33,85	5,06	18,21
	13,25	5,90	170,70	34,53	4,94	17,80
6	13,05	5,70	171,74	35,46	4,84	17,44
	13,05	6,60	167,06	35,69	4,68	16,85
	12,60	5,90	170,70	35,25	4,84	17,43
7	12,60	7,00	164,98	35,93	4,59	16,53
	12,60	6,80	166,02	35,56	4,67	16,81
	11,95	2,60	187,88	44,22	4,25	15,29
8	11,95	5,10	174,87	41,38	4,23	15,21
	11,95	3,00	185,80	43,94	4,23	15,22
	11,00	4,70	176,95	47,04	3,76	13,54
9	11,00	3,30	184,24	50,43	3,65	13,15
	11,00	4,90	175,91	47,53	3,70	13,32
	6,10	7,00	164,98	100,66	1,64	5,90
10	6,10	4,00	83,32	54,47	1,53	5,51
	6,10	20,20	96,28	59,85	1,61	5,79
	5,15	20,20	96,28	77,47	1,24	4,47
11	5,15	20,60	94,20	76,18	1,24	4,45
	5,15	26,50	63,49	50,72	1,25	4,51
	4,20	25,80	67,13	74,17	0,90	3,26
12	4,20	26,70	62,45	68,91	0,91	3,26
	4,20	27,60	57,77	64,87	0,89	3,20

ISSN: 2318-1494

	3,20	25,50	68,70	112,94	0,61	2,19
13	3,20	26,80	61,93	106,87	0,58	2,09
	3,20	28,70	52,04	88,47	0,59	2,12

Fonte: Autores.

Porém ao se fazer a medição de vazão muito inferior foi necessário coletar o volume em um cilindro metálico calibrado e de capacidade de $9\,l$ com uma incerteza de $\pm\,0{,}11\%$, assim como disposto na Tabela 2.

Tabela 2 – Medidas realizadas no cilindro metálico

LÂMINA D'ÁGUA MEDIDA A 2/3 DA GARGANTA (CM)	VOLUME (l)	Δt (s)	VAZÃO (l/s)	VAZÃO (m^3/h)
0,65	4,51	62,59	0,07	0,26
0,65	4,28	61,65	0,07	0,25
0,65	3,92	61,25	0,06	0,23

Fonte: Autores.

Em seguida calculou-se a lâmina média medida a 2/3 a montante da garganta da calha, e da vazão. Vide Tabela 3.

Tabela 3 – Lâmina média e Vazão média

LÂMINA MÉDIA (Hi)	VAZÃO MÉDIA (Qi)
19,27	30,75
17,30	26,67
15,07	21,08
14,42	20,00
13,60	18,39
13,05	17,36
12,60	16,92
11,95	15,24
11,00	13,34
6,10	5,73
5,15	4,48
4,20	3,24
3,20	2,13
0,65	0,25

Fonte: Autores.

5 EQUAÇÃO DA VAZÃO

Adotando-se a função Geométrica, temos pelo método dos mínimos quadrados:

$$Q = bH^a \Longrightarrow \log Q = \log bH^a \Longrightarrow \log Q = \log b + \log H^a$$

$$\boxed{\log Q = \log b + a \log H}$$

Com:

$$Y = ax + B \qquad \begin{cases} Y = \log Q \\ x = \log H \\ B = \log b \end{cases}$$

E listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores para determinar a curva pelos mínimos quadrados

LÂMINA MÉDIA (Hi)	VAZÃO MÉDIA (Qi)	xi	Yi	xi *Yi	xi²
19,27	30,75	1,28	1,49	1,91	1,65
17,30	26,67	1,24	1,42	1,76	1,53
15,07	21,08	1,18	1,32	1,56	1,39
14,42	20,00	1,16	1,30	1,51	1,34
13,60	18,39	1,13	1,26	1,43	1,28
13,05	17,36	1,11	1,24	1,38	1,24
12,60	16,92	1,10	1,23	1,35	1,21
11,95	15,24	1,08	1,18	1,27	1,16
11,00	13,34	1,04	1,12	1,17	1,08
6,10	5,73	0,78	0,76	0,59	0,62
5,15	4,48	0,71	0,65	0,46	0,51
4,20	3,24	0,62	0,51	0,32	0,39
3,20	2,13	0,50	0,33	0,17	0,25
0,65	0,25	-0,19	-0,61	0,11	0,03
∑		**12,77**	**13,22**	**15,02**	**13,70**

Fonte: Autores.

Sendo propostas pelo método as seguintes fórmulas para o cálculo dos coeficientes a e B da função linearizada. Sendo:

$$a = \frac{n\sum x_i Y_i - \sum x_i \sum Y_i}{n\sum {x_i}^2 - (\sum x_i)^2} \tag{14}$$

$$B = \frac{\sum Y_i - a\sum x_i}{n} \tag{15}$$

E com valores apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Valores para determinar a e seu respectivo valor

n	∑ xi Yi	∑ xi ∑ Yi	∑ xi²	(∑ xi)²	a
14	15,02	168,78	13,70	162,98	1,44

Fonte: Autores.

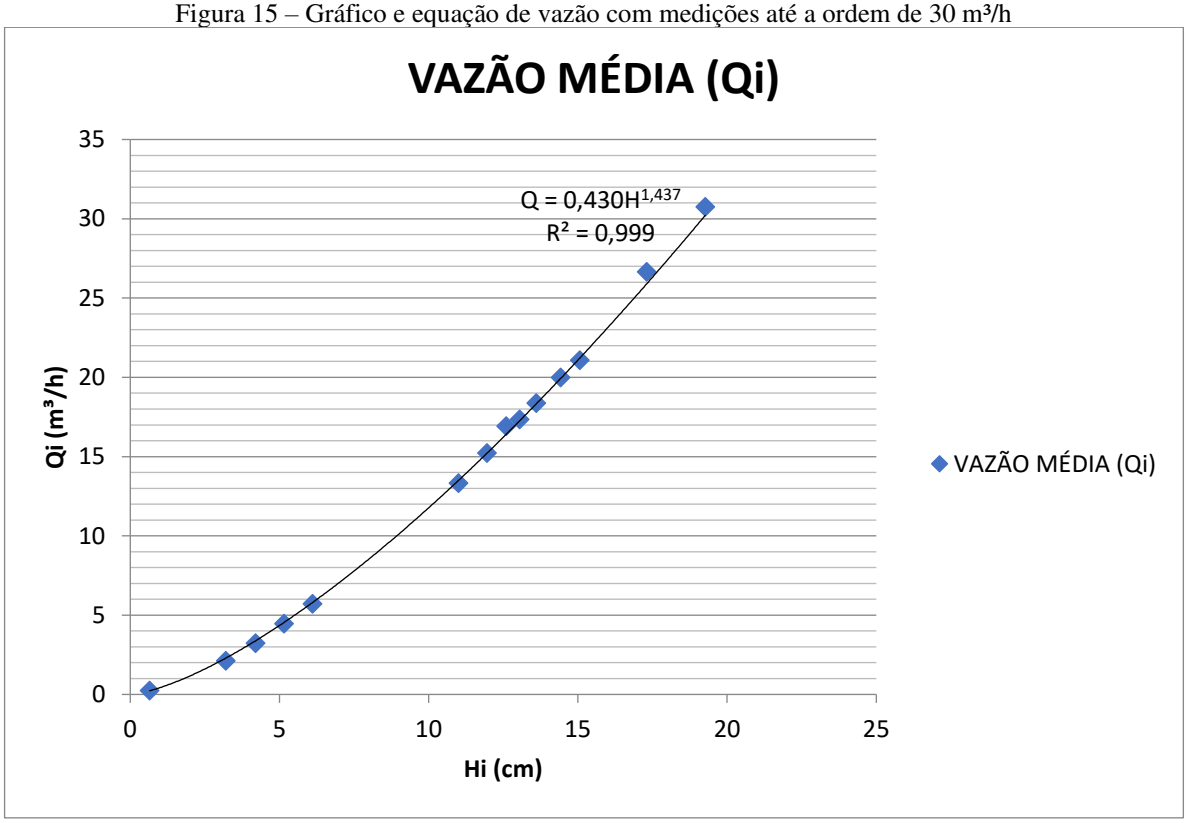
Tabela 6 – Valores para determinar b e seu respectivo valor

n	∑ yi	a	∑ xi	B	b
14	13,22	1,44	12,77	-0,37	0,43

Fonte: Autores.

Conclui-se, por fim, que a equação que rege a vazão e seu respectivo gráfico são os dispostos na Figura 15.

Figura 15 – Gráfico e equação de vazão com medições até a ordem de 30 m³/h



Fonte: Autores.

6 EQUAÇÃO DA VAZÃO DETERMINADA ATRAVÉS DA ESCALA

A localização de 2/3 a montante da garganta da calha Parshall existe uma escala, onde o fabricante expressa a vazão em função da lâmina de água que por este ponto passa. Instados os valores experimentais na Tabela 7.

Utilizando-se do método dos mínimos quadrados e aproximando também da curva Geométrica, temos:

$$Q = bH^a \Longrightarrow \log Q = \log bH^a \Longrightarrow \log Q = \log b + \log H^a$$

ISSN: 2318-1494

$$\log Q = \log b + a \log H$$

$$Y = ax + B \qquad \begin{cases} Y = \log Q \\ x = \log H \\ B = \log b \end{cases}$$

Tabela 7 – valores experimentais em escala logarítmica para determinar a equação da vazão

Lâmina (Hi) cm	Vazão (Qi) m³/h	xi	Yi	xi*Yi	Xi²
5,50	5,00	0,74	0,70	0,52	0,55
8,60	10,00	0,93	1,00	0,93	0,87
11,30	15,00	1,05	1,18	1,24	1,11
13,60	20,00	1,13	1,30	1,47	1,28
15,70	25,00	1,19	1,40	1,67	1,43
17,70	30,00	1,25	1,48	1,84	1,56
19,70	35,00	1,29	1,54	2,00	1,67
21,35	40,00	1,33	1,60	2,13	1,77
23,10	45,00	1,36	1,65	2,25	1,86
24,70	50,00	1,39	1,70	2,37	1,94
26,35	55,00	1,42	1,74	2,47	2,02
27,90	60,00	1,44	1,78	2,57	2,09
∑		**14,55**	**17,07**	**21,47**	**18,15**

Fonte: Autores.

Pelo método dos mínimos quadrados, tem-se:

$$a = \frac{n \sum x_i Y_i - \sum x_i \sum Y_i}{n \sum {x_i}^2 - (\sum x_i)^2} \tag{14}$$

$$B = \frac{\sum Y_i - a \sum x_i}{n} \tag{15}$$

Sendo os termos para determinar os coeficientes da equação iguais à:

$$\sum x_i = 14{,}55 \qquad \sum Y_i = 17{,}07 \qquad \sum x_i Y_i = 21{,}47$$

$$\sum x_i \sum Y_i = 248{,}37 \qquad \sum {x_i}^2 = 18{,}15 \qquad \left(\sum x_i\right)^2 = 211{,}76$$

Obtendo coeficientes: $a = 1{,}529$ $B = -0{,}432$

ISSN: 2318-1494

Porém determina-se apenas $\boldsymbol{a}$ como coeficiente da equação que rege a vazão, precisando determinar b.

$$B = \log b \Longrightarrow b = 10^{B} \Longrightarrow b = 0{,}369$$

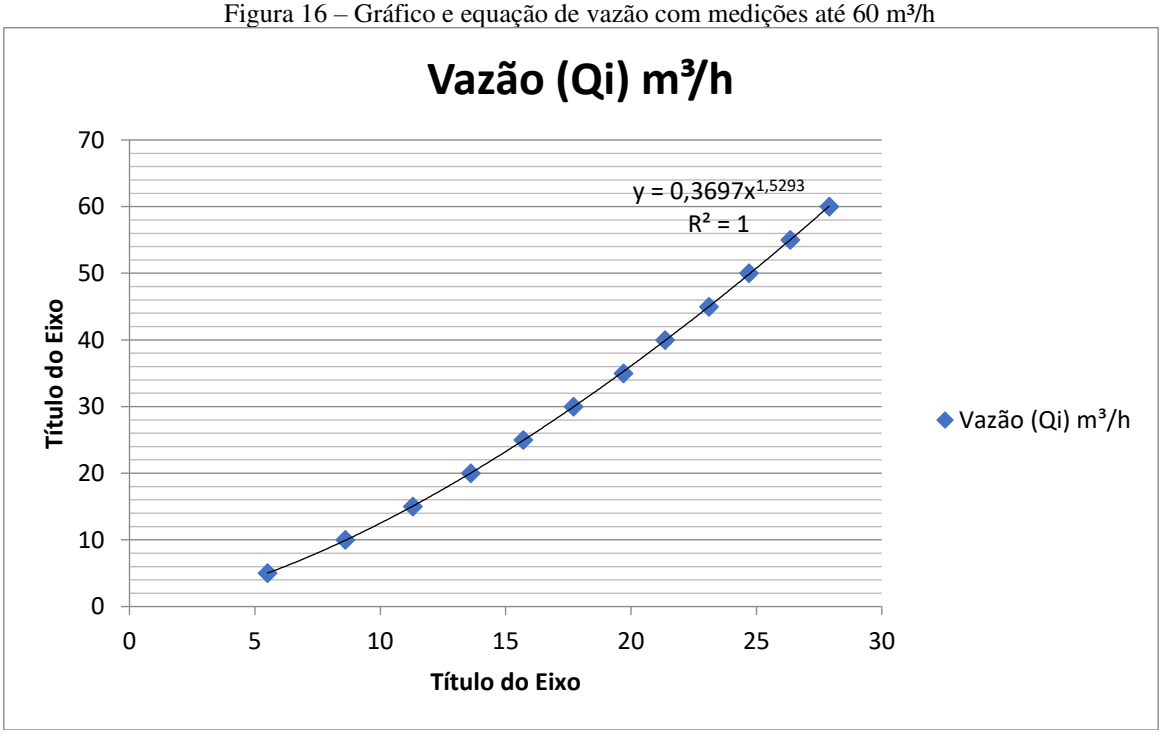
Assim, a vazão é regida pela seguinte equação:

$$Q = 0{,}369H^{1{,}529}$$

Sendo a vazão medida m^3/h e a altura em cm.

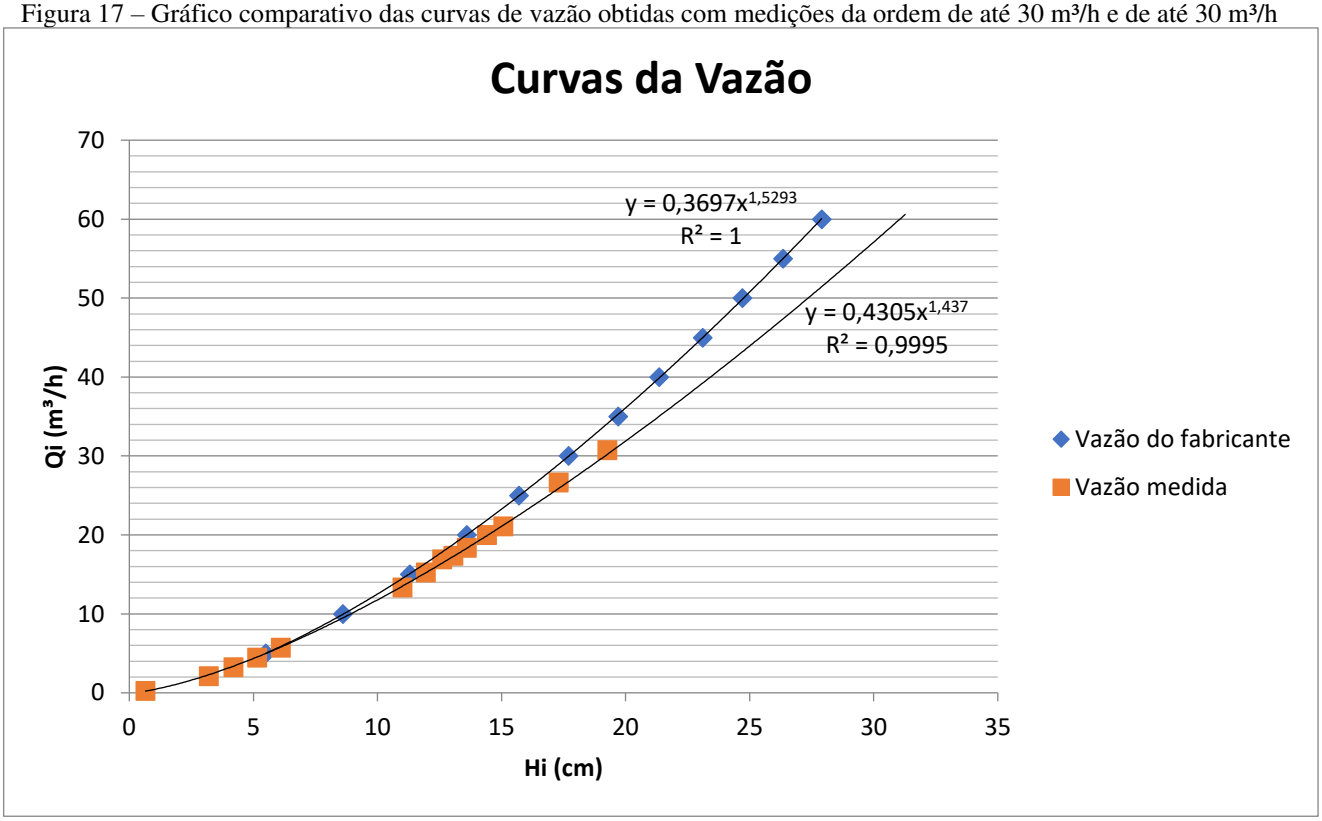
Conclui-se, assim, que a equação que rege a vazão e seu respectivo gráfico constam na Figura 16. E comparada na Figura 17 a curva determinada por cada limite de medições.

Figura 16 – Gráfico e equação de vazão com medições até 60 m³/h



Fonte: Autores.

Figura 17 – Gráfico comparativo das curvas de vazão obtidas com medições da ordem de até 30 m³/h e de até 30 m³/h



Fonte: Autores.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da análise do gráfico da função proposta pelo fabricante e a função calculada no laboratório, conclui-se que até uma vazão de 10 m³/h as curvas se confundem, porém em vazões superiores a discrepância tende a aumentar consideravelmente.

Com base em todos os cuidados tomados no laboratório para se diminuir a incerteza no tempo, no volume em consequentemente na vazão, adotar-se-á a equação da vazão calculada e por ela está definida no intervalo de 0,25 a 30,75 m³/h e a calha ter capacidade de medir vazões até 60 m³/h. Além de proceder a extrapolação destes pontos através desta equação.

Esta discrepância fica bem evidente no gráfico apresentado na Figura 17, onde se confrontam as duas equações.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, Ronildo Inácio Soares; MELO, Weslley Imperiano Gomes de; **Análise das incertezas na determinação do volume de um cilindro metálico pelo método gravimétrico e por medição do diâmetro e altura**; João Pessoa; 23/08/2010.

Fenômenos da Engenharia. Disponível em: https://fenomenosdaengenharia.blogspot.com/2013/06/calha-parshall.html. Acessada em 25/05/2026.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Mecânica dos Fluidos**; 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

SPIEGEL, Murray R. **Estatística**. Tradução de Pedro Cosentino. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976.

STREETER, Victor L.; WYLIE, E. Benjamin. **Mecânica dos fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1982.