

Avaliação da vazão escoada por meio da calha Parshall (modelo Armfield)

Parshall flume operation assessment (Armfield model)

• **Data de entrada:**
25/09/2019

• **Data de aprovação:**
23/12/2019

Guilherme Vigarani de Assis¹ | Liliane Frosini Armelin^{1*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.040>

ORCID ID

Assis GV  <https://orcid.org/0000-0002-8655-2417>

Armelin L F  <https://orcid.org/0000-0002-2740-9557>

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo teórico e experimental sobre o instrumento de medição de vazão calha Parshall da empresa Armfield, o qual apresentava resultados experimentais diferentes da literatura ao realizar as medições de vazão no canal hidráulico de fundo reclinável presente na Universidade Presbiteriana Mackenzie. Contudo, foram realizados procedimentos para adequar o funcionamento do equipamento, tais como: conferência das dimensões da calha, verificação do medidor eletromagnético do canal, teste de declividade de fundo do canal e sua interferência no equipamento, ensaios para determinação da vazão e afogamento da calha. Em síntese, foi elaborada uma nova equação, que se adequou melhor ao funcionamento do aparelho e demonstrou ser efetiva para a utilização deste equipamento.

Palavras-chave: Calha Parshall. Medição de Vazão. Canal Hidráulico. Armfield.

Abstract

This paper presents a theoretical and experimental study on the Armfield company's Parshall flume flow measurement instrument, which presented experimental results different from the literature when used for measurement the flow in the hydraulic reclining channel of the same company of the tool present at the Mackenzie Presbyterian University. However, procedures were elaborated for the elaboration of a new corrected equation for the equipment, such as: checking the dimensions of the channel, verification of the channel electromagnetic meter, channel background slope test and its interference in the equipment, tests to determinate the flow and tests to settle the specific situation which the Parshall flume is submerged. In synthesis, a new equation was elaborated and extinguished the huge experimental error present in the apparatus, demonstrating itself effective for the use of this equipment.

Keywords: Parshall Flume. Flow Measurement. Hydraulic Channel. Armfield.

¹ Universidade Presbiteriana Mackenzie – São Paulo – São Paulo – Brasil.

* **Autora correspondente:** liliane.armelin@mackenzie.br.

1 INTRODUÇÃO

O conflito pelo uso da água é o principal fator que vem estimulando a sociedade contemporânea a buscar a conservação e o melhor manejo desse recurso limitado em nosso planeta (SKOGERBOE et al., 1966).

Com o passar dos anos, está sendo atribuído cada vez mais um maior valor a água, portanto a necessidade de se ter uma ideia exata sobre os aspectos qualitativos e quantitativos desse elemento vem se tornando cada dia mais necessária, a passo que o consumo vem aumentando na mesma proporção. Partindo do fato mencionado, equipamentos são desenvolvidos a todo momento para cumprir com esse propósito. Não obstante, pode-se mencionar a calha Parshall, um dos medidores de vazão mais populares e que apresenta um uso intensivo para essa finalidade.

Esse equipamento de medição pode ser usado para a aferição da vazão em condutos livres. Portanto, pode-se usar a calha Parshall em pequenos rios, canais hidráulicos usados em laboratórios, entre outros, sendo caracterizada como um dos melhores medidores de vazão para condutos abertos (PÉREZ, 2005). No entanto, também se pode utilizá-la em estações de tratamento para misturar soluções químicas à água que será tratada.

O aparato foi inventado pelo engenheiro americano Ralph Leroy Parshall (1881-1960), o qual trabalhava no Serviço de Irrigação do Departamento de Agri-

cultura dos Estados Unidos. Ele se baseou nos estudos realizados por Giovanni Batista Venturi (primeiro cientista a demonstrar o funcionamento do tubo de Venturi, o qual consiste em um medidor de vazão).

Um dos equipamentos que surgiram no mercado foi a calha Parshall do fabricante Armfield, que não funciona exatamente como o equipamento idealizado por seu inventor, porém possui vantagens em relação a este. Neste trabalho, foi realizada uma análise deste, além de uma adaptação da equação fornecida pelo fabricante.

2 OBJETIVOS

A pesquisa refere-se ao estudo de uma calha medidora de vazão fabricada pela empresa britânica Armfield (Fig. 1) denominada calha Parshall. Ese equipamento foi adquirido junto a um canal didático e outros acessórios da mesma empresa e caracteriza-se por uma seção de entrada seguida de uma seção estrangulada ou garganta que proporciona uma mudança no tipo de escoamento devido ao aumento da velocidade com redução de linha da água. Na sequência há um trecho divergente, criando uma zona de dissipação de energia.

Nessa categoria de medidores, a variação na velocidade resulta na variação da altura da linha d'água ao longo da calha. Esses elementos podem ser relacionados para a determinação da vazão.



Figura 1 - Vistas da calha Parshall fabricada pela empresa Armfield.

Fonte: Os autores (2018)

Calhas desse tipo são medidores que se incluem na categoria de regime crítico. Segundo Netto(1998), tais medidores podem consistir num simples estrangulamento adequado de seção, no rebaixo ou alteamento do fundo ou numa combinação conveniente dessas singularidades.

Para a utilização da calha Parshall, foi elaborada por R. L. Parshall uma equação para a determina-

ção da vazão (Q), que por definição é o volume de um determinado fluido que passa por uma certa seção de um conduto forçado ou livre em um determinado tempo. Nessa equação relacionam-se valores constantes, que são determinados experimentalmente e que variam de calha em calha por conta de aspectos como a viscosidade do fluido, as dimensões do instrumento e a largura do canal entre outros.

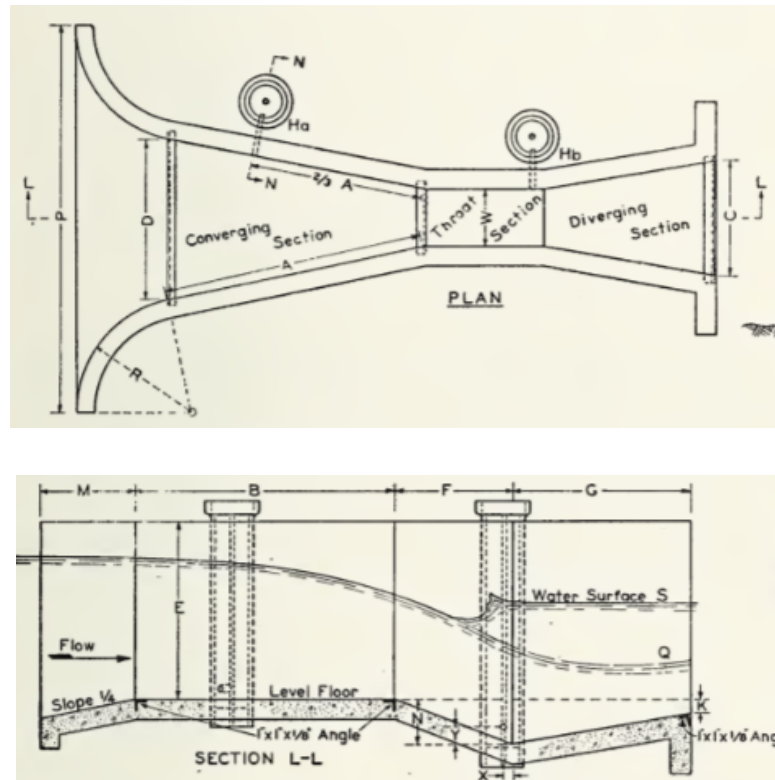


Figura 2 - Calha Parshall convencional, vista superior e corte longitudinal
Fonte: Parshall, 1950.

A Eq. 1 foi fornecida pelo fabricante para a situação de funcionamento livre (sem afogamento). Essa equação é a mesma que estabelecida no trabalho publicado no século passado por R. L. Parshall para calhas de garganta com largura de 3 polegadas.

$$Q = 0,177 * H_1^{1,55} \quad (1)$$

Sendo:

Q = Vazão volumétrica em m^3/s

H = altura da linha da água na entrada da calha em metros

Na equação da calha Parshall, tem-se uma relação direta entre a vazão e uma única altura d'água. Isso é possível se o grau de contração na largura e as condições do escoamento são tais que a superfície livre passe pela altura crítica na garganta. Nesse caso, após a seção crítica, o escoamento é torrencial, com a formação de um ressalto hidráulico na saída da garganta, retor-

nando ao regime fluvial a jusante da transição. Essa é a forma de funcionamento para a qual normalmente se projeta uma calha medidora.

Em operação, a calha Parshall pode apresentar-se em uma específica circunstância denominada afogada, que ocorre quando se observa na garganta uma elevação da linha da água, não permitindo o escoamento livre, resultando em uma resistência à vazão e conseqüentemente na redução da capacidade de vazão do dispositivo.

Caso o medidor esteja nesta situação, será necessária a medição de outra carga próxima à seção final da garganta denominada H_2 . Submergência ou razão de submersão é determinada pela relação entre H_2 e H_1 , sendo H_1 a altura da linha d'água a montante (entrada da calha) e H_2 a altura da mesma a jusante (final da garganta). Essa variável, junto com H_1 , foi relacionada em um ábaco que permite a determinação da redução de vazão (Fig. 3). O cenário mencionado pode variar de calha em calha, ao passo que, no equipamento em estudo, encontra-se afogada caso o índice de submergência seja igual ou superior a cinquenta por cento, segundo o fabricante. Parshall, em seu trabalho, concluiu que as calhas de garganta 3, 6 ou 9 polegadas estariam afogadas

quando a razão de submersão fosse igual ou superior a 0,60 (60%).

A necessidade do estudo da calha presente na Universidade Presbiteriana Mackenzie surge à medida que foi constatado um funcionamento distinto do equipamento, portanto não esperado, daquele encontrado nos estudos de Parshall. Essa, por sua vez, apresentava vazões diferentes em relação à outra forma de medição existente no equipamento, em torno de 10%. Outra característica observada foi a não formação do ressalto hidráulico no trecho divergente e, conseqüentemente, a permanência no regime torrencial, impossibilitando o afogamento da calha para vazões maiores. As calhas do tipo Parshall afogam para grandes vazões, e por causa disso apresentam uma redução na capacidade de vazão. Essa característica de afogamento requer uma correção que está na literatura através de ábacos (Parshall, 1950).

O objetivo deste trabalho surgiu da necessidade de realização de uma adaptação para a redução das diferenças apontadas, o que consistiu na elaboração de uma nova equação para a determinação da vazão. Especificamente, foi feita uma avaliação do funcionamento do equipamento na busca das principais vantagens no seu uso.

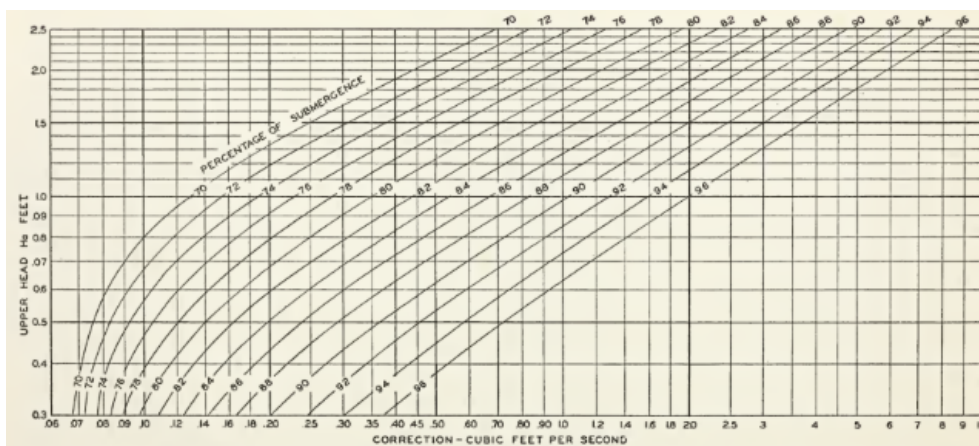


Figura 3 - Exemplo de ábaco para uma calha de 6 polegadas.

Fonte: Parshall, 1950.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Em canais abertos, pode-se dotar de métodos simples para a medição da vazão, como por exemplo o uso de vertedores. Entretanto, os mesmos podem apresentar desvantagens em seus usos, já que favorecem uma maior perda de carga e altos níveis de sedimentação. Partindo desse panorama, surge como solução o uso de calhas Venturi, especificamente uma variante dessas, denominada calha Parshall (HOUGHTALEN et al., 2012).

Segundo os estudos de R.L Parshall presentes na circular de número 843, datada de 1950, declara-se que a ideia da criação do medidor Parshall

surge em conjunto com a necessidade de ter uma maior gestão e distribuição da água no processo de irrigação em fazendas. Para tal, esses mensuradores tinham que ser precisos e confiáveis em relação ao fluxo que estava a ser medido, já que, segundo o autor, uma distribuição mais igualitária dos suprimentos é importante para uma maior eficiência na irrigação.

A calha Parshall foi desenvolvida empiricamente para o sistema britânico de medidas, sendo suas dimensões fixas especificadas pela Tabela 1. Cada unidade padronizada tem determinada capacidade de vazão. A denominação do medidor segue a largura de sua garganta (Fig. 2).

Tabela 1 - Dimensões padronizadas de medidores Parshall.

W	W (cm)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)	K (cm)	N (cm)	n	Vol. Max.(l/s)	Vol. Min.(l/s)
1"	2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9	-	-	-
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7	1,547	0,850	53,802
6"	15,2	62,3	61,0	39,4	40,3	61,0	30,5	61,0	7,6	11,4	1,580	1,416	110,436
9"	22,9	88,1	86,4	38,1	57,5	76,2	30,5	45,7	7,6	11,4	1,530	2,549	252,020
1'	30,5	137,1	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,522	3,115	455,901
1,5'	45,7	144,8	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,538	4,248	696,594
2'	61,0	152,3	149,3	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,550	11,893	937,288
3'	91,5	167,5	164,2	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,566	17,273	1427,169
4'	122,0	182,8	179,2	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,578	36,812	1922,714
5'	152,5	198,0	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,587	45,307	2423,922
6'	183,0	213,3	209,1	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,595	73,624	2930,794
7'	213,5	228,6	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,601	84,951	3437,665
8'	244,0	244,0	239,0	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	1,606	99,109	3950,200
10'	305,0	274,5	260,8	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3	-	200,0	5660,000

Fonte: Netto, 1998

Segundo Netto (1998), as medidas que compõem cada elemento das calhas Parshall de dimensão 1 a 8 pés podem ser determinadas de maneira aproximada segundo as Eq. 2 a 10 a seguir:

$$A = \frac{B}{\cos \alpha} \quad (2)$$

$$B = 0,49 W + 119,4 \text{ (cm)} \quad (3)$$

$$C = W + 30,5 \text{ (cm)} \quad (4)$$

$$D = 1,196 W + 47,9 \text{ (cm)} \quad (5)$$

$$E = G = 91,5 \text{ cm} \quad (6)$$

$$F = 61 \text{ cm} \quad (7)$$

$$N = F (9/24) \quad (8)$$

$$K = N - \frac{G}{6} \quad (9)$$

$$\alpha = \text{arc tg} \frac{D - W}{2B} \quad (10)$$

Na seção convergente, o fundo encontra-se nivelado, passando a ser inclinado na região da

garganta na razão de 9 unidades de medida na vertical para 24 unidades de medida na horizontal, sendo que todos os tamanhos atendem a essa razão de inclinação. Foi projetada para gerar o escoamento crítico em sua seção mais estreita, denominada garganta.

A calha Parshall deve ser instalada de uma determinada maneira para evitar grandes turbulências na sua seção inicial e erros de leitura. O ideal é que sua instalação seja realizada em trechos retilíneos do canal. Ao final da seção divergente pode-se ter um degrau.

Para a determinação da vazão de maneira experimental usando o aparato em estudo, é estabelecida por R.L. Parshall a equação da calha, que é definida de maneira genérica segundo a Eq. 11, onde “ λ ” e “ n ” são valores determinados experimentalmente.

$$Q = \lambda \cdot H_1^n \quad (11)$$

A equação mencionada pode ser justificada segundo a teoria dos medidores de regime crítico, que por sua vez estabelece, em certas conjunturas, uma relação entre a profundidade limite e dois regimes de escoamento, o torrencial e o fluvial, sendo assim denominada por profundidade crítica.

Abordando as estruturas da calha, essas devem ser resistentes, geralmente feitas de materiais como chapa de aço, madeira, concreto ou acrílico, sendo uma variável que depende do lugar em que será implementada e da durabilidade planejada. A unidade estudada foi confeccionada em fibra de vidro e permite que a passagem da vazão ocorra facilmente, inclusive com a capacidade de dificultar a deposição dos materiais em suspensão ou os que estão flutuantes no fluxo d'água devido ao aumento da velocidade do escoamento na garganta.

Devido às vantagens do medidor, o uso do mesmo vem se diversificando e indo além das expectativas. Segundo (NETTO, 1952), esses medidores são aplicados para maior controle da velocidade nas caixas de areia existentes nas estações de tratamento de esgoto. Um outro emprego dado ao equipamento em 1947 por Morgan e Ryan quando projetaram uma calha para a cidade de Greeley, Colorado, e função que persiste nos dias atuais, em que o medidor se tornou um dispositivo com a finalidade de realizar misturas de forma rápida, assim o usando essencialmente para a dispersão de coagulantes no tratamento da água.

Dados os vastos usos do medidor Parshall, o inventor do dispositivo oficializou (Parshall, 1936) e (Parshall, 1950) duas situações possíveis de operação. A primeira circunstância apontada é definida como vazão livre, consistindo assim em uma condição na qual é considerada apenas a altura da lâmina de água para o cálculo da vazão, não havendo durante o percurso desta no equipamento perdas de energia ou alterações na mesma. Porém, após a água passar pela garganta, a mesma sofre um leve declive para depois sofrer um aclave, causando assim um ressalto hidráulico na região. Dessa forma surge o segundo cenário possível, caracterizado como fluxo submerso, em que, segundo o autor, a relação entre H_2/H_1 é superior a 0,7 para as calhas de 1 a 8 pés e de 0,6 para as de 3, 6 e 9 polegadas, necessitando do ábaco para correção da vazão.

Parshall, em seu trabalho, elaborou um ábaco para a calha de garganta igual a 1 pé, e dessa forma, para usar o mesmo gráfico para outros modelos, foi estipulado um fator de correção (M) que é demonstrado na Tabela 2 a seguir, bastando dessa forma apenas multiplicar o valor que deve ser subtraído da vazão primeiramente calculada por esse fator de correção (M), obtendo por consequência o valor referente à vazão de redução.

Tabela 2 - Fator multiplicador referente a diferentes tamanhos de calha Parshall.

Tamanho da garganta (W) – Polegadas	Fator multiplicador (M)
1	1,0
1,5	1,4
2	1,8
3	2,4
4	3,1
5	3,7
6	4,3
7	4,9
8	5,4

Fonte: Parshall (1950)

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi constituída de 5 etapas, sendo as etapas preliminares as abordagens relacionadas aos equipamentos no sentido de averiguar se tinham as mesmas características geométricas e de vazão estudadas no experimento de Parshall.

Sendo assim, a primeira etapa foi a comparação das medidas da calha da Armfield com as medidas da calha padronizada por Parshall. A segunda etapa foi a verificação da veracidade da vazão escoada no canal onde está implantado o equipamento estudado, que tem um medidor próprio para aferição. A terceira etapa foi a investigação

da influência da declividade na medição de vazão pela calha estudada. A quarta etapa consistiu nos ensaios em que a vazão aferida pela calha é comparada com a vazão aferida pelo medidor do canal (procedimento análogo ao realizado em SINGH; 2014) e finalmente a quinta e última etapa se refere às investigações relativas à influência do afogamento da calha na aferição da vazão.

4.1 Conferência das dimensões da calha

Para início, há necessidade de averiguar se a calha em análise realmente pode ser classificada com um medidor de vazão Parshall ou se a mesma apenas pode receber o título genérico de medidor de vazão. Para tal, segundo o pesquisador R.L.Parshall, como já mencionado anteriormente, o equipamento deve seguir padrões de medidas em centímetros de acordo com o tamanho nominal da garganta (W), portanto deve-se medir o instrumento em estudo para obter a referida classificação. Para tal, utiliza-se uma trena e um paquímetro para medições mais precisas. No caso desta pesquisa, os valores devem ser correspondentes a uma calha de garganta de 3 polegadas, como pode ser conferido na tabela abaixo:

Tabela 3 - Dimensões padronizadas de medidores Parshall de 3"

W	W (cm)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)	K (cm)	N (cm)
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7

Fonte: Netto, 1952

4.2 Conferência da vazão

O canal onde foi instalada a calha, do mesmo fabricante, tem um medidor de vazão do tipo eletromagnético. Foi necessário examinar o seu funcionamento e isso foi realizado por meio de um outro medidor, instalado na tubulação de en-

trada da água no canal. Utilizou-se um medidor de vazão do tipo ultrassônico do modelo Thermo Scientific DCT7088 portable da empresa Thermo Fisher Scientific (Figs. 4 e 5). O procedimento foi realizado segundo a medição da vazão em conduto fechado ditado pela NBR 16198 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

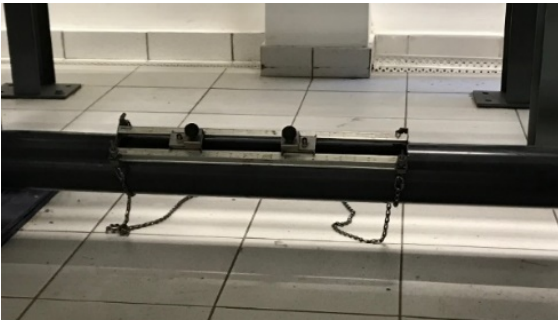


Figura 4 - Central de leitura do medidor ultrassônico DCT7088

Fonte: Os autores (2018)



Fig. 5 - Medidor ultrassônico acoplado na tubulação do canal hidráulico para aferição da vazão.

Fonte: Os autores (2018)

Posteriormente, executa-se um comparativo com uma outra calha de mesmo modelo e fabricante presente na UPM campus Campinas para verificar se existe o mesmo problema ou se é apenas uma questão existente no exemplar presente em estudo.

4.3 Análise da influência da declividade de fundo do canal na medição da vazão pela calha

Possuindo os resultados dos itens anteriores, instauram-se os experimentos, nos quais a calha deve estar posicionada no canal de forma que tenha uma distância da entrada do mesmo que possibilite uma maior estabilidade do fluxo de água. Nesta pesquisa, o equipamento encontra-se a uma distância de 8,8 metros da entrada do canal, que possui comprimento total de 10 metros.

O primeiro ensaio realizado na calha foi variando a inclinação do canal, deixando-o primeiramente na posição horizontal (declividade nula) e em seguida com uma inclinação 1/500 (variação de 1 metro na vertical para a variação de 500 metros na horizontal), mantendo uma vazão constante nos dois ensaios, para analisar os efeitos da declividade sobre a aferição da vazão pela calha.

4.4 Ensaios realizados com o objetivo de comparação da vazão do medidor eletromagnético do canal com a vazão da calha

Iniciaram-se ensaios com a comporta de fundo completamente abaixada, garantindo o escoamento livre no canal. Com isso, foi possível o estabelecimento da vazão máxima comportada pela calha. Foram realizadas 28 simulações, onde se procurou variar a vazão de forma a iniciar em um valor reduzido até o máximo que o dispositivo comportava. Para cada vazão adotada, mediu-se a altura da linha da água na entrada da calha H_1 , e com esses pares de variáveis foi construído um diagrama que relacionou a vazão com o H_1 . Por meio de regressão, foi ajustada uma curva a esses pontos experimentais.

4.5 Afogamento da calha

Segundo o fabricante, a calha em estudo pode ser considerada afogada quando o índice de submergência é igual ou superior a 50%. Dessa forma, o valor H_2 foi coletado também na execução dos ensaios, para o cálculo desse índice.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como descrito na metodologia, iniciou-se pela realização das medições das dimensões, referente à calha estudada. As dimensões estão apresentadas na Tabela 4 comparativamente à pesquisa de Parshall.

Tabela 4 - Dimensões do medidor estudado de 3” da empresa Armfield’.

W	W (cm)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)	K (cm)	N (cm)
Medidas da Calha Parshall da empresa Armsfield										
3”	7,6	47,5	45,6	17,8	25,9	18,6	14,5	30,5	2,4	5,4
Medidas da Calha Parshall apresentadas por R.L.Parshall										
3”	7,6	46,6	45,6	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7

Fonte: Os autores, modificado (2018)

Ao confrontar a calha estabelecida por Parshall e a da empresa Armfield, percebe-se uma pequena diferença nos elementos A, F, K, N e principalmente no E, o qual possui a diferença de dimensão mais significativa.

Logo em seguida investiga-se o bom funcionamento do medidor eletromagnético do canal por meio do medidor ultrassônico. Essa verificação foi realizada por meio de alguns ensaios com variação de vazão. Os resultados mostram que o

mesmo se encontra em perfeito estado de funcionamento, executando a medição da vazão de maneira que a diferença entre os dois medidores, em torno de 3%, esteja dentro do esperado para esse tipo de equipamento.

Posteriormente realizaram-se ensaios para analisar a influência da declividade do canal no funcionamento da calha; para tal, segue a Tabela 5 com as informações referentes.

Tabela 5 - Relação entre a declividade de fundo do canal e a vazão da calha estudada

Ensaio	Declividade	Vazão (Medidor eletromagnético do canal) (L/s)	H ₁ (m)	Vazão (Equação calha fornecida pelo fabricante) (L/s)
1	0	5,90	0,1065	5,50
2	1/500	5,90	0,1059	5,45

Fonte: Os autores (2018).

Na mesma época, na Universidade Presbiteriana Mackenzie campus Campinas, executaram-se ensaios para averiguar o comportamento da calha, de mesmo modelo e fabricante, referente ao cálculo da vazão, utilizando a equação determinada por Parshall e as respectivas diferenças experimentais. Os mesmos se encontram na Tabela 6. Na análise desses resultados, observou-se que as diferenças ocorridas na unidade de Campinas são distintos da unidade de São Paulo, porém são significativos.

Os resultados dos ensaios para a determinação da medida H₁ em relação à vazão do medidor

eletromagnético se encontram na Tabela 6. Foi utilizada a equação estabelecida por Parshall indicada pelo fabricante do equipamento e assim calculada a vazão resultante, comparando-a com a do medidor eletromagnético e determinando a diferença entre ambas, considerando que esta última seja a correta. Para isso foram feitos 28 ensaios variando de 5 l/s até 12,5 l/s, alcançando praticamente a capacidade máxima da vazão da calha da empresa Armfield, de 12,6 l/s. Foi estabelecido que a capacidade máxima seria aquela em que a lâmina da água atinge a altura máxima da calha.

Tabela 6 - Simulações no canal para comparação das vazões medida e calculada

Ensaio	Vazão (Medidor eletromagnético do canal) (L/s)	H ₁ (m)	H ₂ (m)	Vazão (Equação calha fornecida pelo fabricante) (L/s)	H ₂ /H ₁ (%)	Diferença exp. (%)
1	5,0	0,0946	-	4,58	-	8,46
2	5,5	0,1018	-	5,13	-	6,76
3	5,9	0,1073	-	5,56	-	5,69
4	6,2	0,1099	-	5,77	-	6,86
5	6,5	0,112	-	5,95	-	8,52
6	6,7	0,1158	-	6,26	-	6,54
7	7,0	0,1207	-	6,68	-	4,61
8	7,2	0,1212	-	6,72	-	6,66
9	7,5	0,1255	-	7,09	-	5,42
10	7,7	0,1275	-	7,27	-	5,59
11	8,0	0,1319	-	7,66	-	4,22
12	8,2	0,1323	-	7,70	-	6,12
13	8,5	0,1361	-	8,04	-	5,37
14	8,7	0,1376	-	8,18	-	5,96
15	9	0,1418	-	8,57	-	4,76
16	9,2	0,1444	0,0658	8,82	46	4,17
17	9,5	0,1468	0,0688	9,04	47	4,79
18	9,7	0,148	0,0702	9,16	47	5,57
19	10,0	0,1517	0,074	9,52	49	4,83
20	10,1	0,1522	0,0737	9,57	48	5,29
21	10,2	0,1532	0,0745	9,66	49	5,26
22	10,3	0,154	0,0751	9,74	49	5,42
23	10,4	0,1554	0,0764	9,88	49	5,01
24	10,5	0,156	0,0788	9,94	51	5,35
25	11,0	0,1616	0,0825	10,50	51	4,57
26	11,5	0,1656	0,0862	10,90	52	5,20
27	12,0	0,1711	0,0899	11,47	53	4,43
28	12,5	0,1746	0,0938	11,83	54	5,33

Fonte: Os autores (2018).

Na análise desses resultados, observou-se que os erros apresentados na unidade de Campinas são distintos dos da unidade de São Paulo, porém são significativos. Verificou-se que apenas o último ensaio apresentou características de erro similares e, por esses motivos, decidiu-se pela não utilização desses dados nesta pesquisa.

A partir das verificações iniciais de variáveis que interferem no processo e cujos resultados incorretos poderiam influenciar negativamente os resultados da pesquisa, comprometendo a verificação do erro entre o medidor do canal e a medição da calha, iniciam-se os ensaios para a determinação da medida H₁ e vazão do medidor eletromagnético que dava origem a essa medida; com essas duas variáveis, utilizou-se a equação estabelecida por Parshall para calcular a vazão

resultante, comparando-a com a do medidor eletromagnético e calculando o erro entre ambas, considerando que esta última seja a correta. Para tal foram feitos 28 ensaios, variando de 5 l/s até 12,5 l/s, alcançando praticamente a capacidade máxima da vazão da calha da empresa Armfield, de 12,6 l/s. Foi estabelecido que a capacidade máxima seria aquela em que a lâmina da água atinge a altura máxima da calha. Os resultados das simulações estão na Tabela 7 abaixo.

Com o objetivo de análise do erro experimental, os pontos foram plotados em um gráfico (Fig. 6) que demonstrou que esse erro é reduzido conforme se aumenta a vazão. Foi ajustada uma linha de tendência otimizada aos pontos de forma a facilitar essa análise.

Observou-se também, pelas mesmas simulações, que o afogamento da calha ocorre apenas quando a vazão está próxima da máxima, como observado nos ensaios 24, 25, 26, 27 e 28. Segundo a literatura, nestes pontos deveria acontecer uma redução de vazão, ou seja, um erro ocasionado

pelo afogamento do dispositivo. No entanto, observou-se nesses ensaios que, apesar de a vazão ser alta, não ocorre a elevação da linha da água a jusante da garganta e, conseqüentemente, não existe uma obstrução no escoamento com conseqüente redução de vazão.

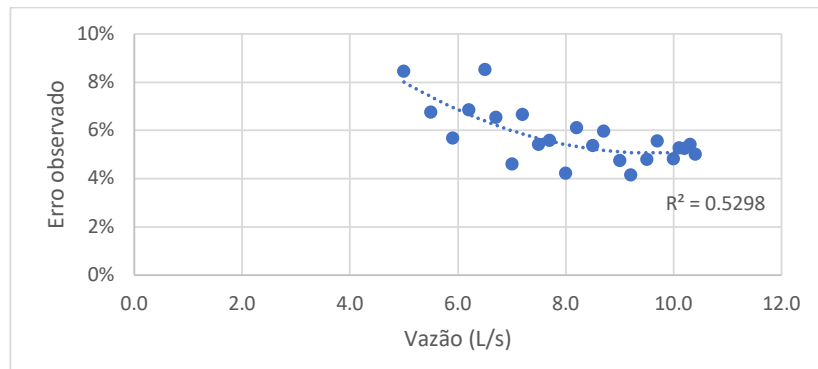


Figura 6 - Plotagem dos pontos de vazão do medidor eletromagnético com o erro observado em relação à vazão proveniente da calha estudada.

Fonte: Os autores (2018)

6 CONCLUSÕES

Ao analisar os resultados obtidos, a calha analisada não pode ser denominada calha medidora de vazão do tipo Parshall, mas sim apenas calha medidora de vazão, já que as dimensões apresentadas, principalmente a altura, não são as mesmas daquelas apontadas por R.L. Parshall em seus artigos. Dessa forma, a equação proposta pelo inventor não é adequada para o cálculo da vazão neste equipamento.

Desta feita, tornou-se necessário o ajuste de uma outra equação, mais representativa da vazão através da calha estudada. Para isso, plotaram-se os pontos dos ensaios realizados em um gráfico de eixo x, representando a altura da linha da água na entrada da calha H1 e no eixo y, a vazão do medidor do canal. Na sequência, foi realizado o ajuste de uma nova curva do tipo exponencial, sendo o coeficiente de correlação próximo a 1, indicando um excelente ajuste. O resultado está abaixo na Fig. 7.

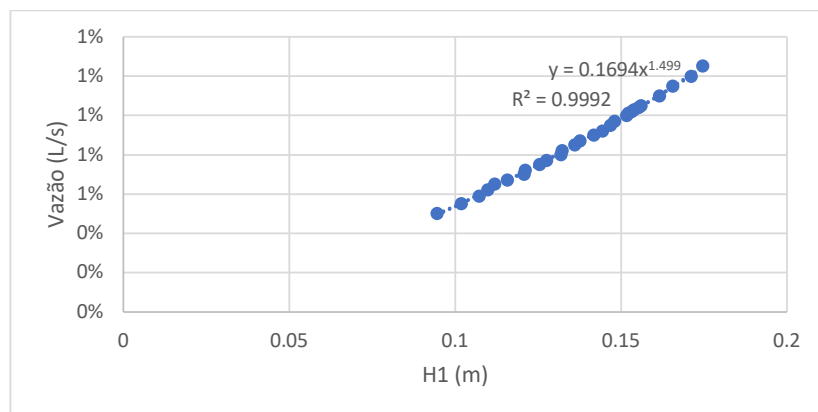


Figura 7 - Relação entre a vazão do leitor eletromagnético e a primeira altura

Fonte: Os autores (2018).

Diante do exposto, a nova equação do dispositivo será:

$$Q_{livre} = 0,1694 \cdot H1^{1,499} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (12)$$

Posteriormente, conclui-se que a inclinação presente no canal não influencia o valor da vazão calculada experimentalmente, algo que pode ser comprovado pelo experimento presente na Tabela 5, nos quais os valores são próximos, com diferença de 0,05 l/s.

A justificativa para o não afogamento da calha é que a água, ao entrar no canal, apresenta-se em regime fluvial, porém, próximo à situação crítica, que é a transição entre os regimes fluvial e torrencial. Isso ocorre devido à baixa rugosidade do canal, pois ao adentrar no equipamento há o estrangulamento da seção, aumentando ainda mais a velocidade, e conseqüentemente ocorre uma redução na linha da água. Na saída da calha, a velocidade deveria diminuir devido ao alargamento de seção, porém isso não ocorre satisfatoriamente, pois o canal à frente se encontra em regime quase crítico, não ocorrendo o ressalto hidráulico responsável por retornar a água para um fluxo fluvial, no qual haveria novamente o aumento da linha d'água e teria uma resistência a jusante. Por conta desses aspectos, essa calha não afoga. Uma vantagem interessante, pois não há a necessidade de correção da vazão.

Com o ajuste da equação para a determinação da vazão por meio da calha, o funcionamento fica alinhado com o funcionamento do medidor eletromagnético de vazão do canal, podendo essa calha ser utilizada para qualquer vazão, não apresentando limitações relativas a um possível afogamento a jusante.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie por todo o auxílio disponibilizado para esta pesquisa.

8 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

9 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16198: Medição de vazão de fluidos em condutos fechados – Métodos usando medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito – Diretrizes gerais de seleção, instalação e uso.** Rio de Janeiro, 2013.
- HOUGHTALEN, R. J.; HWANG, Ned H. C., OSMAN AKAN, A. - **Engenharia Hidráulica.** 4ª Edição. São Paulo: Material didático, 2012. ISBN: 9788581430881
- NETTO, JOSÉ M. DE AZEVEDO. - **Medidores de régimen crítico: Medidores Parshall.** São Paulo: Artigo científico. Faculdade de Higiene e Saúde Pública da Universidade de São Paulo. USP, 1952.
- NETTO, JOSÉ M. DE AZEVEDO. - **Manual de Hidráulica.** 8ª ed. São Paulo. 1998. ISBN: 9788521205005
- PARSHALL, R.L. - **Measuring water in irrigation channels with Parshall flumes and small weirs.** Washington, D.C : Circular nº 843. United States departamen of agriculture, 1950.
- PARSHALL, R.L. - **The Parshall measuring flume.** Fort Collins, Colorado: Boletim, nº423 - Colorado State College, 1936.
- PÉREZ, R.M. - **Medidores em régimen crítico.** Medellín: Manual. Universidade Nacional de Colombia - Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 2012.
- SINGH, J.; MITTAL, S.K.; TIWARI H.L. – Discharge relation for small Parshall flume in free flow condition. **International Journal of Research in Engineering and Technology.** Vol: 03, nº04 (2014). [Consult. 20 de julho 2018]. Disponível internet: <http://www.ijret.org>. ISSN:2319-1163.
- SKOGERBOE, G.V.; HYATT, M.L.; ANDERSON, R.K.; EGGLESTON, K.O. - **Measuring Water with Parshall Flumes.** Utah: Artigo científico. Utah State University, Utah Water Research Laboratory, 1966.