

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

DETALHAMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO ANALÍTICO GENERALIZADO PARA A VAZÃO EM CALHAS PARSHALL

Bruno de Oliveira Lázaro¹; João Marcelo Vedovotto² & Alice Rosa da Silva³

Abstract: This article presents the systematic detailing of the generalized equation for determining flow rates in Parshall flumes, originally proposed by Ralph Leroy Parshall in 1926. Although the Parshall flume is widely used for flow measurement in open channels, notably in water and wastewater treatment plants, the generalized equation that underpins its operation remains relatively unknown and underutilized by the scientific community. In contrast, the empirical equation has become consolidated in professional practice due to its operational simplicity. However, this empirical approach presents significant limitations, including the tendency to overestimate flow rates and the inability to consider fundamental aspects related to the distribution of specific energy, flow regimes, and turbulence dynamics. In this study, a complete and rigorous derivation of the generalized equation was conducted, based on the application of specific energy theory and consideration of the flume's variable geometry, with particular emphasis on the critical condition established at the throat. The results obtained demonstrate that the generalized equation represents a robust mathematical model, capable of providing more accurate and physically grounded flow estimates, thereby overcoming the inherent limitations of the traditional empirical model. The research also highlights the importance of disseminating and deepening knowledge about this formulation, promoting its use as an analytical tool in hydraulic engineering. Thus, this work contributes to strengthening the theoretical foundation of flow measurement practices, offering support for the adoption of more rigorous and generalizable models in various operational contexts.

Resumo: Este artigo apresenta o detalhamento sistemático da equação generalizada para a determinação da vazão em calhas Parshall, originalmente proposta por Ralph Leroy Parshall em 1926. Embora a calha Parshall seja amplamente utilizada na medição de vazão em canais abertos, notadamente em estações de tratamento de água e esgoto, a equação generalizada que fundamenta seu funcionamento permanece relativamente desconhecida e subutilizada pela comunidade científica. Em contrapartida, a equação empírica consolidou-se na prática profissional devido à sua simplicidade operacional. Contudo, essa abordagem empírica apresenta limitações importantes, incluindo a tendência à superestimação da vazão e a incapacidade de considerar aspectos fundamentais relacionados à distribuição da energia específica, aos regimes de escoamento e à dinâmica da turbulência. Neste estudo, foi realizada a dedução completa e rigorosa da equação generalizada, fundamentada na aplicação da teoria da energia específica e na consideração da geometria variável da calha, com destaque para a condição crítica estabelecida na garganta. Os resultados alcançados demonstram que a equação generalizada representa um modelo matemático robusto, capaz de fornecer estimativas de vazão mais precisas e fisicamente fundamentadas, superando as limitações inerentes ao modelo empírico tradicional. A pesquisa evidencia, ainda, a importância de disseminar

1) Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Hidráulica e Hidrologia. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y Sala 1Y113. Uberlândia/MG, Brasil. E-mail: bruno.lazaro@ufu.br.

2) Laboratório de Mecânica dos Fluidos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M Sala 1M212. E-mail: vedovotto@ufu.br.

3) Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Hidráulica e Hidrologia. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y Sala 1Y113. Uberlândia/MG, Brasil. E-mail: alicers@ufu.br.

e aprofundar o conhecimento sobre essa formulação, promovendo seu uso como ferramenta analítica na engenharia hidráulica. O trabalho contribui, assim, para o fortalecimento do embasamento teórico das práticas de medição de vazão, oferecendo subsídios para a adoção de modelos mais rigorosos e generalizáveis em diversos contextos operacionais.

Palavras-Chave – Calha Parshall. Modelagem Matemática. Engenharia Hidráulica.

INTRODUÇÃO

A medição de vazão em canais abertos representa uma atividade essencial na engenharia hidráulica, com aplicações fundamentais em sistemas de abastecimento de água, estações de tratamento de esgoto e água, projetos de irrigação e gestão ambiental. Nesse contexto, a Calha Parshall consolidou-se, ao longo das últimas décadas, como um dos dispositivos mais utilizados para essa finalidade, em função de sua simplicidade construtiva, baixa perda de carga e capacidade de operar sob condições variadas de escoamento.

Na prática profissional e na engenharia aplicada, a determinação da vazão em calhas Parshall é frequentemente realizada por meio de uma equação empírica do tipo exponencial. Esta equação estrutura a vazão escoada na calha como uma função da altura da superfície livre em uma seção à montante da garganta (conhecida como seção de controle), medida a uma distância previamente padronizada. Além disso, coeficientes empíricos também são incorporados à equação e estão associados à geometria da própria calha. A ampla aceitação desta fórmula deve-se, sobretudo, à sua praticidade e à facilidade de aplicação em campo, possibilitando a rápida conversão de uma medida simples de profundidade em uma estimativa de vazão (PORTO, 2006).

Todavia, apesar de sua conveniência operacional, a equação empírica apresenta limitações importantes que precisam ser consideradas. Diversos estudos indicam que, em determinadas condições, essa formulação tende a superestimar a vazão, sobretudo em situações que se afastam das condições padrão de calibração (FOX *et al.*, 2018).

Além disso, o modelo empírico não incorpora aspectos cruciais do comportamento do escoamento, tais como a distribuição da energia específica ao longo da calha, a variação dos regimes de escoamento, a ocorrência de escoamento crítico na garganta e os efeitos da turbulência. Esses fatores possuem influência direta sobre o desempenho hidráulico da calha e podem comprometer a precisão da medição quando não devidamente considerados (JAMES, 2020).

Em contraste com essa abordagem empírica amplamente disseminada, Ralph Leroy Parshall, ainda em 1926, desenvolveu uma equação generalizada para a determinação da vazão em calhas Parshall, fundamentada exclusivamente nos princípios teóricos da mecânica dos fluidos e na geometria variável do dispositivo. Esta equação, que expressa de forma implícita a relação entre a profundidade medida e a vazão, deriva da aplicação rigorosa da teoria da energia específica e da consideração da condição crítica estabelecida na garganta da calha, sem recorrer a ajustes empíricos.

Apesar de sua robustez conceitual e de representar um modelo mais fiel à realidade fluidodinâmica do escoamento, a equação generalizada de Parshall permanece pouco conhecida e pouco explorada pela comunidade científica e técnica. Esse relativo desconhecimento é atribuído, em parte, à sua complexidade algébrica, que a torna de mais difícil aplicação em comparação com a fórmula empírica tradicional.

Neste cenário, o presente artigo propõe-se a realizar o detalhamento sistemático e rigoroso da equação generalizada proposta por Parshall, com o intuito de ampliar sua compreensão e fomentar

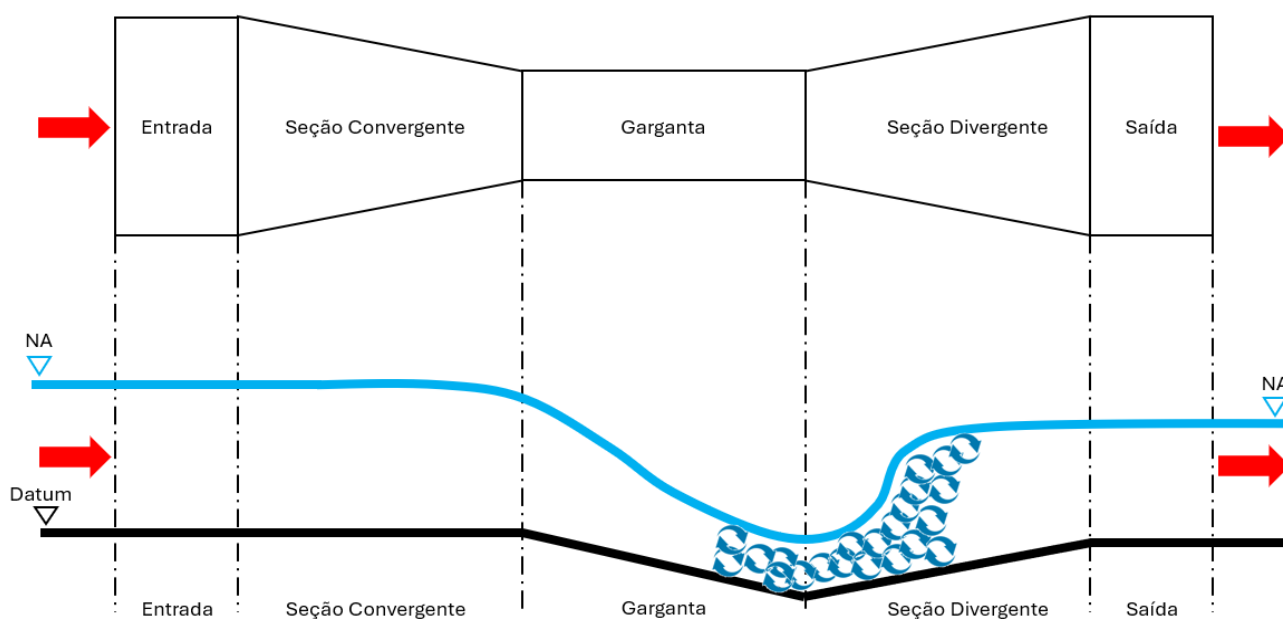
sua utilização como ferramenta analítica robusta para a determinação da vazão em calhas Parshall. A relevância desta pesquisa justifica-se pela necessidade de superar as limitações inerentes à abordagem empírica, disponibilizando à engenharia hidráulica um modelo matemático mais preciso, capaz de incorporar as nuances associadas à energia específica, ao regime de escoamento e às condições fluidodinâmicas que caracterizam o funcionamento dessas estruturas.

Assim, o objetivo central deste estudo é apresentar, com o devido rigor teórico e matemático, a dedução completa da equação generalizada de vazão em calhas Parshall, originalmente formulada por Parshall, bem como discutir suas potencialidades e limitações frente à equação empírica tradicional. Espera-se, com isso, proporcionar à comunidade acadêmica e profissional uma base sólida para a adoção de modelos mais precisos e fundamentados na medição de vazão, contribuindo para o aprimoramento das práticas de engenharia e para a gestão mais eficiente dos recursos hídricos.

CONCEITOS FUNDAMENTAIS E DESENVOLVIMENTO DA CALHA PARSHALL

O princípio de funcionamento da calha Parshall fundamenta-se na modificação geométrica do canal para induzir uma condição de escoamento crítico, que estabelece uma relação direta entre a profundidade da lâmina d'água e a vazão. A operação desse dispositivo hidráulico baseia-se na aceleração do escoamento, provocada por uma redução progressiva e constante da largura da seção transversal e, frequentemente, pela alteração da inclinação do fundo, principalmente na região da garganta. Essa configuração geométrica (Figura 1) induz o escoamento a atingir a condição crítica, caracterizada por um número de Froude igual a um, o que possibilita relacionar a vazão de forma unívoca à profundidade da lâmina d'água medida em um ponto padronizado a montante da garganta (PORTO, 2006; BAPTISTA; COELHO, 2018; JAMES, 2020).

Figura 1 – Exemplo esquemático de geometria de Calha Parshall.



Em termos operacionais, a medição de vazão em calhas Parshall requer apenas a determinação da profundidade em uma seção previamente estabelecida, sendo a vazão calculada com base em

relações funcionais que podem assumir tanto a forma empírica, amplamente utilizada na prática profissional, quanto a forma analítica, conforme o modelo generalizado proposto por Parshall. Assim, a calha Parshall atua como um dispositivo de controle hidráulico, promovendo a transição entre regimes de escoamento subcrítico e supercrítico, de acordo com as condições específicas de instalação e operação. O seu funcionamento fundamenta-se, portanto, na aplicação direta da teoria da energia específica, que estabelece a relação entre profundidade, velocidade e vazão em canais com seção variável (AZEVEDO NETO; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2015; CHANSON, 2015).

O desenvolvimento da calha Parshall remonta ao início da década de 1920, quando Ralph Leroy Parshall iniciou uma série de investigações no Laboratório de Irrigação da então *Colorado Agricultural College* (atualmente *Colorado State University*), em Fort Collins, Colorado, Estados Unidos. O objetivo de Parshall era criar um dispositivo que possibilitasse a mensuração precisa da vazão volumétrica em canais abertos destinados à irrigação, superando as limitações projetuais, construtivas e operacionais dos equipamentos disponíveis até então.

Como resultado desses estudos, Parshall e sua equipe conceberam uma estrutura composta por três elementos fundamentais: uma seção convergente de entrada, uma garganta estreita e rebaixada e uma seção divergente de saída. Esta geometria específica induz a aceleração do escoamento até que seja atingida a condição crítica em um ponto característico da garganta, promovendo o controle hidráulico necessário para a medição precisa e eficiente da vazão ao longo da estrutura (PARSHALL, 1926).

A partir desse desenvolvimento, Parshall elaborou uma equação generalizada analítica, fundamentada exclusivamente na teoria da energia específica e na geometria variável da calha, sem recorrer a ajustes empíricos. Essa equação, embora robusta do ponto de vista teórico, permaneceu por muito tempo pouco disseminada, sendo posteriormente complementada por ajustes empíricos que facilitaram sua aplicação prática, mas que, por outro lado, não consideram plenamente aspectos importantes como a distribuição da energia específica, os regimes de escoamento e a dinâmica da turbulência, elementos essenciais para a compreensão e análise aprofundada do funcionamento das calhas Parshall.

DEDUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO ANALÍTICO GENERALIZADO

Conforme exposto anteriormente, o objetivo da calha Parshall é possibilitar a medição da vazão escoada ao longo da estrutura em questão. Para tanto, Parshall desenvolveu um modelo matemático analítico que pode ser aplicado a qualquer calha, independentemente do ponto de medição da altura da lâmina líquida e das dimensões geométricas da própria calha.

A dedução algébrica completa da equação generalizada da calha Parshall fundamenta-se na aplicação da teoria da Energia Específica (E) em um canal retangular de geometria variável. A calha Parshall possui uma seção transversal cuja largura varia ao longo da direção longitudinal x , de forma a se promover a aceleração do escoamento e ocorrência de regime crítico na garganta. Tradicionalmente, E pode ser expressa conforme explicita a Equação 1.

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Em que y representa a profundidade da lâmina líquida (m), v é a velocidade média do escoamento (m/s) e g é a aceleração da gravidade (m/s²).

Ao se considerar um canal de seção transversal retangular, tem-se que a área (A) da seção em uma posição longitudinal qualquer (x) pode ser expressa pelo produto de sua base $[b(x)]$ com a altura

da lâmina líquida $[y(x)]$. Assim, pelo princípio de conservação de massa e considerando o escoamento no canal como incompressível, permanente e preferencialmente unidirecional ao longo da direção x , tem-se que a vazão volumétrica escoada pode ser expressa conforme a Equação 2.

$$Q = A \cdot v = b(x) \cdot y(x) \cdot v(x) \quad (2)$$

Desta maneira, pode-se expressar a velocidade média do escoamento $v(x)$ como uma função da própria vazão escoada (Equação 3).

$$v(x) = \frac{Q}{b(x) \cdot y(x)} \quad (3)$$

Diante dessa exposição, pode-se reescrever a equação de E, substituindo (3) em (1), resultando em um modelo matemático analítico para a energia específica em função da vazão escoada, conforme exposto na Equação 4.

$$E(x) = y(x) + \frac{Q^2}{2g \cdot [b(x)]^2 \cdot [y(x)]^2} = y(x) + \frac{Q^2}{2g \cdot b^2(x) \cdot y^2(x)} \quad (4)$$

Paralelamente, em relação à geometria particular da calha Parshall, tem-se que esta estrutura foi desenvolvida para operar de modo que a largura da seção transversal varie linearmente com a posição x ao longo do eixo longitudinal da calha, tal qual expressa a Equação 5.

$$b(x) = b_o(1 + kx) \quad (5)$$

Em que b_o representa a largura mínima da calha, ou seja, a largura da garganta (m), e k representa um coeficiente adimensional de incremento gradativo da largura no sentido à montante da garganta. De acordo com os experimentos de Parshall (1926), convencionou-se um valor de 0,4 para o coeficiente k . Desta maneira, pode-se, novamente, reescrever a equação da energia específica como explicita a Equação 6.

$$E(x) = y(x) + \frac{Q^2}{2g \cdot b_o^2(1+kx)^2 \cdot y^2(x)} = y(x) + \frac{Q^2}{2g \cdot b_o^2(1+0,4x)^2 \cdot y^2(x)} \quad (6)$$

Paralelamente a isso, tem-se que, na garganta e na seção de controle de medição à montante da garganta, a calha opera com escoamento em regime crítico. Matematicamente, o regime crítico é caracterizado por um número de Froude (Fr) unitário (Equação 7).

$$Fr = \frac{v(x)}{\sqrt{g \cdot y(x)}} = 1 \quad (7)$$

Nesta perspectiva, substituindo-se a Equação 3 na Equação 7, pode-se reescrever a condição crítica de escoamento (Equação 8).

$$\sqrt{g \cdot y(x)} = \frac{Q}{b(x) \cdot y(x)} \quad (8)$$

Ao se elevar ambos os termos da equação anterior ao quadrado, tem-se a seguinte expressão (Equação 9).

$$g \cdot y(x) = \frac{Q^2}{b^2(x) \cdot y^2(x)} \quad (9)$$

Reorganizando-se a Equação 9, torna-se possível determinar, matematicamente, a profundidade crítica do escoamento $[y_c(x)]$. Esta profundidade é entendida como aquela na qual o escoamento atinge regime crítico. Profundidades superiores à $y_c(x)$ indicam escoamentos subcríticos, enquanto profundidades inferiores indicam escoamentos supercríticos. Para o caso específico da calha Parshall, pode-se expressar a profundidade crítica como uma função da vazão escoada ao longo da estrutura e da largura da seção de controle, conforme explana a Equação 10.

$$y_c(x) = \left(\frac{Q^2}{g \cdot b^2(x)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Substituindo a Equação 10 na Equação 6 e aplicando-se para a largura b_o , tem-se a chamada condição de energia específica crítica, conforme demonstra a Equação 11.

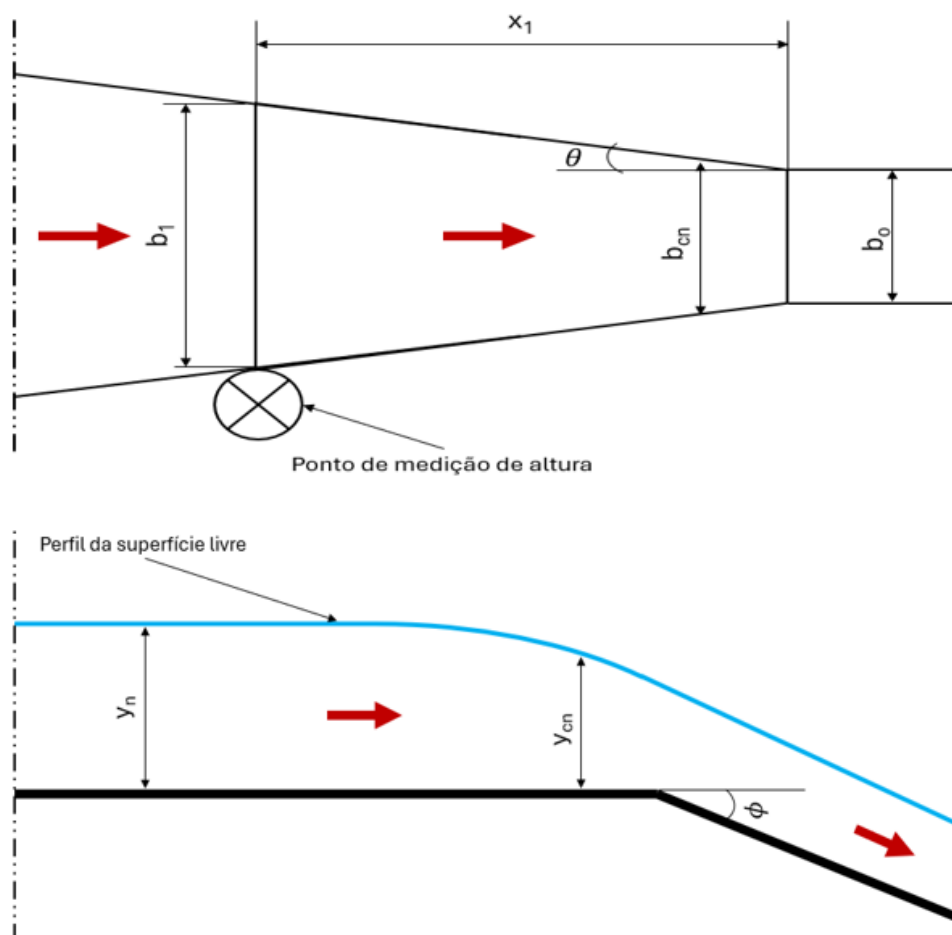
$$E(x) = y_c(x) + \frac{Q^2}{2g \cdot b_o^2(1+0,4x)^2 \cdot y_c^2(x)} = \left(\frac{Q^2}{g \cdot b_o^2(x)} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{Q^2}{2g \cdot b_o^2(1+0,4x)^2 \cdot \left(\frac{Q^2}{g \cdot b_o^2(x)} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (11)$$

Simplificando-se o segundo termo da equação anterior, tem-se, finalmente, que a Energia Específica para a calha Parshall pode ser denotada, analiticamente, conforme demonstra a Equação 12.

$$E(x) = Q^{\frac{2}{3}} \cdot \left[\left(\frac{1}{g \cdot b_o(x)} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{2} g^{-\left(\frac{1}{3}\right)} \right] \quad (12)$$

Em termos práticos, para diversas aplicações de engenharia e industriais, Parshall sugere que a profundidade da superfície livre do escoamento (profundidade da lâmina d'água) seja medida em uma posição padronizada à montante da garganta ($x = x_1$), conforme apresenta a Figura 2.

Figura 2 – Vista superior e lateral de seção de interesse da calha Parshall.



Nesta posição específica, a largura da seção convergente pode ser expressa conforme mostra a Equação 13.

$$b(x_1) = b_o(1 + 0,4 \cdot x_1) \quad (13)$$

Assim, neste ponto em particular, a energia específica é função unicamente da vazão e da geometria da calha (Equação 14).

$$E(x_1) = Q^{\frac{2}{3}} \cdot \left[\left(\frac{1}{g \cdot b_o(x_1)} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{2} g^{-\left(\frac{1}{3}\right)} \right] \quad (14)$$

Conforme exposto anteriormente, o princípio de operação da calha Parshall explicita que a vazão escoada ao longo da estrutura é função da profundidade da lâmina líquida do escoamento na seção de controle. Esta profundidade $y_n(x)$ se relaciona, matematicamente, à vazão por meio do princípio de conservação da energia específica. Neste sentido, negligenciando-se as perdas de carga ao longo do trecho convergente da calha, tem-se a Energia Específica na seção de controle como demonstra a Equação 15.

$$y_n(x_1) + \frac{Q^2}{2g \cdot b_o^2(1+0,4 \cdot x_1)^2 \cdot [y_n(x_1)]^2} = E(x_1) \quad (15)$$

De modo simplificado, o termo do lado direito da Equação 15 e que exprime a energia específica como uma função da vazão escoada, pode ser expresso como mostra a Equação 16.

$$\phi(Q) = K \cdot Q^m \quad (16)$$

Da Equação 16, os parâmetros K e m são constantes adimensionais empíricas estabelecidas por Parshall associadas, respectivamente, ao comprimento de convergência e à inclinação de entrada na garganta. Através de diversos estudos experimentais, Parshall obteve que os melhores valores para essas constantes são 1,352 e 0,615, respectivamente. Deste modo, a Equação 15 pode ser reescrita na forma exposta a seguir (Equação 17).

$$\phi(Q) = 1,352 \cdot Q^{0,615} \quad (17)$$

Finalmente, ao se confrontar a Equação 17 com a Equação 14, tem-se a forma final generalizada da equação matemática que descreve a vazão ao longo de uma calha Parshall (Equação 18).

$$y_n(x_1) + \frac{Q^2}{2g \cdot b_o^2(1+0,4 \cdot x_1)^2 \cdot [y_n(x_1)]^2} = 1,352 \cdot Q^{0,615} \quad (18)$$

Em que $y_n(x_1)$ representa a profundidade da superfície livre do escoamento no ponto de medição (m), x_1 representa a posição longitudinal do ponto de medição (m), b_o representa a largura da garganta da calha Parshall (m), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), e Q é a vazão escoada ao longo da calha (m^3/s).

A Equação 18 relaciona, de forma rigorosa e teoricamente consolidada, a profundidade da superfície livre do escoamento, a vazão escoada, a largura da garganta da calha e a posição da medição. Desta maneira, tem-se que a equação incorpora em seus termos características fundamentais da geometria da calha Parshall e da própria fluidodinâmica do escoamento dentro de seu domínio.

Todavia, por sua natureza implícita, a aplicação prática desse equacionamento demanda por métodos numéricos e computacionais robustos para sua solução e determinação da vazão escoada na calha. Além disso, a formalização da Equação 18 enquanto um modelo matemático analítico generalizado para a vazão na calha Parshall exige a adoção de algumas hipóteses para o escoamento, a saber:

I. Escoamento permanente e unidimensional;

- II. Perfil hidrostático de pressões;
- III. Escoamento uniforme à montante da garganta;
- IV. Condição de escoamento crítico à montante da garganta;
- V. Rugosidade interna constante ao longo de toda a calha;
- VI. Ausência de perdas de carga significativas;
- VII. Regime de escoamento subcrítico à montante da garganta e supercrítico à jusante.

Somado a estas hipóteses, por fim, as Equações 19 e 20 formalizam o modelo matemático analítico generalizado para a vazão em calhas Parshall.

$$\begin{cases} F(Q, y_n(x_1), b_o, x_1, g) = 0 & (19) \\ y_n(x_1) + \frac{Q^2}{2g \cdot b_o^2 (1+0,4 \cdot x_1)^2 \cdot [y_n(x_1)]^2} = 1,352 \cdot Q^{0,615} & (20) \end{cases}$$

MODELO EMPÍRICO DA VAZÃO EM CALHAS PARSHALL

Após o desenvolvimento da calha e da obtenção de um modelo matemático generalizado baseado na teoria da energia específica, os trabalhos de Parshall foram continuados por diversos pesquisadores internacionais. Neste contexto, destacaram-se os estudos conduzidos pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR) e pelo *United States Department of Agriculture* (USDA).

Ambas as organizações se dedicaram à condução de extensas pesquisas experimentais com o objetivo de testar diferentes escalas de calhas Parshall. Os experimentos possibilitaram o desenvolvimento e a consolidação de tabelas padronizadas que associam os parâmetros expostos na Equação 18 para dimensões características pré-determinadas de calhas.

Essa padronização incentivou o processo de industrialização das calhas e favoreceu sua ampla produção e utilização para diversas finalidades industriais, sanitárias, ambientais e de engenharia em geral. Somado a isso, a consolidação de um extenso banco de dados experimental possibilitou o desenvolvimento de uma equação matemática empírica para a vazão nas calhas Parshall (Equação 21).

$$Q = c \cdot h^n \quad (21)$$

Onde Q representa a vazão escoada na calha Parshall (m^3/s), c e n são coeficientes adimensionais empíricos associados às dimensões de largura da garganta e profundidade de cada calha, e h representa o valor da profundidade da superfície livre do escoamento (m) medida na seção de controle.

Tendo em vista a formalização da Equação 21 enquanto um modelo matemático empírico, torna-se necessário a consideração de hipóteses adicionais às anteriormente expostas, a saber:

- I. Escoamento deve ser totalmente livre (não submerso);
- II. Calha construída sobre dimensões padronizadas;
- III. Faixa de vazão a ser mensurada condizente com as dimensões da calha; e,
- IV. Ponto de medição da profundidade padronizado.

Somado a isso, as Equações 22 e 23 sintetizam, formalmente, o modelo empírico em questão.

$$\begin{cases} F(Q, h) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} Q = c \cdot h^n \end{cases} \quad (23)$$

Diferentemente do modelo generalizado proposto por Parshall, o modelo empírico foi desenvolvido com base na experimentação material e na aplicação de recursos estatísticos de regressão. Desta maneira, a Equação 23 tem sido mais amplamente empregada em aplicações práticas que demandam maior agilidade na estimativa da vazão escoada na calha.

Por fim, torna-se conveniente salientar que, embora a equação empírica seja extremamente prática e amplamente utilizada, sua precisão depende diretamente do atendimento a essas hipóteses. Sempre que houver desvios das condições padrão, como alterações na geometria, presença de submersão ou efeitos locais de turbulência, recomenda-se cautela na aplicação do modelo ou, alternativamente, o uso de abordagens mais rigorosas, como a equação generalizada ou técnicas de modelagem numérica.

CONCLUSÕES

O presente estudo realizou o detalhamento sistemático e rigoroso da equação matemática analítica generalizada para a determinação da vazão em calhas Parshall, originalmente proposta por Ralph Leroy Parshall em 1926. A partir da aplicação dos princípios da teoria da energia específica e da consideração da geometria variável do dispositivo, foi possível demonstrar que o modelo generalizado oferece uma formulação mais robusta, precisa e fisicamente fundamentada do que a tradicional abordagem empírica consolidada na prática profissional.

Os resultados obtidos evidenciam que a equação generalizada, embora de aplicação mais complexa, possui potencial significativo para aprimorar as práticas de medição de vazão, especialmente em cenários que demandam maior rigor analítico e confiabilidade nas estimativas. Ao incorporar explicitamente aspectos essenciais da dinâmica do escoamento, como a distribuição da energia específica, o regime crítico na garganta e a variação geométrica ao longo da calha, o modelo matemático desenvolvido supera as limitações inerentes ao modelo empírico, notadamente sua tendência à superestimação das vazões e sua incapacidade de representar adequadamente fenômenos fluidodinâmicos fundamentais.

Destaca-se, ainda, que a estruturação formal do modelo analítico generalizado requer, para sua plena aplicação, o emprego de métodos numéricos e ferramentas computacionais capazes de resolver a relação implícita entre profundidade e vazão, o que impõe desafios operacionais, mas também abre perspectivas relevantes para o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras no âmbito da engenharia hidráulica.

Nesse sentido, a presente pesquisa contribui de forma substancial para o fortalecimento do embasamento teórico das práticas de medição de vazão em calhas Parshall, estimulando a adoção de modelos mais rigorosos e generalizáveis. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de investigações experimentais e computacionais adicionais que validem a aplicação prática da equação generalizada em diferentes contextos operacionais e escalas de calhas, bem como a integração desta formulação a sistemas automatizados de monitoramento de vazões, ampliando sua aplicabilidade e impacto nas áreas de saneamento, irrigação e gestão de recursos hídricos.

Assim, este estudo reforça a necessidade de uma revisão crítica das práticas tradicionais, promovendo a disseminação e valorização do modelo generalizado como ferramenta analítica indispensável para a engenharia hidráulica contemporânea.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO NETO, J. M.; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M. *Manual de hidráulica*. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. *Fundamentos de engenharia hidráulica*. Belo Horizonte: Ed. Da UFMG, 2018.

CHANSON, H. (Ed.). *Energy dissipation in hydraulic structures*. Boca Raton: CRC Press, 2015.

FOX, R. W. et al. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

JAMES, Christopher Stephen. *Hydraulic structures*. Cham, Switzerland: Springer, 2020.

PARSHALL, R. L. *Parshall flume rating and use*. Fort Collins: Colorado Agricultural Experiment Station, 1926. Disponível em: <<https://archives.mountainscholar.org/digital/collection/p17393coll49/id/462/rec/87>>. Acesso em: 5 de abr. 2025.

PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 4. ed. rev. São Carlos: EESC-USP, 2006.