ANÁLISE DAS METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO E EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DE DESCIDAS D'ÁGUA EM DEGRAUS

ASSESSMENT OF THE DIMENSIONING AND HYDRAULIC EFFICIENCY OF STEPPED SPILLWAYS

Letícia Karine Sanches Brito - leticiabrito@ste-simemp.com.br - https://orcid.org/0000-0002-7905-5340
Renan Ribeiro Guzzo - renan.guzzo@dnit.gov.br - https://orcid.org/0009-0000-4914-3502
Meiry Elizabeth dos Santos - meiry.santos@dnit.gov.br - https://orcid.org/0009-0007-2801-8455
Simoneli Fernandes Mendonça - simoneli.fernandes@dnit.gov.br - https://orcid.org/0009-0003-9163-549X
Alex de Sousa Bento - alex.bento@dnit.gov.br - https://orcid.org/0009-0002-2342-4538

RESUMO: As descidas d'água são definidas como dispositivos que possibilitam o escoamento das águas conduzidas pelas sarjetas, meios-fios, valetas, bueiros ou galerias, e que vertem sobre os taludes de corte ou aterros (DNIT, 2004). O dimensionamento hidráulico deste dispositivo pode ser realizado pelo método do perfil da linha d'água ou pelo método empírico (DNIT, 2006). No Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), não existem referências para o dimensionamento de descidas em degraus. Para o dimensionamento hidráulico de estruturas em degraus foram utilizados os métodos *Skimming flow* e *Nappe flow* com base em experimentos encontrados na bibliografia. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi investigar as metodologias de dimensionamento das descidas em degraus com base no referencial publicado no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006). Verificou-se no diagnóstico que é necessário a alteração da geometria das descidas em degraus, pois as seções atuais são insuficientes de acordo com a análise hidráulica utilizando o *Skimming flow e o Nappe flow*. Desta forma, com base na análise realizada nesta pesquisa, destacam-se esforços necessários para revisão do Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006).

PALAVRAS-CHAVE: descidas d'água; *Skimming flow*; *Nappe flow*; drenagem de rodovias.

ABSTRACT: *Spillways are defined as devices that allow the flow of water conducted by gutters, curbs, ditches, culverts or galleries, and that spill over the cutting slopes or landfills (DNIT, 2004). The hydraulic dimensioning of this device is made by the direct step or empirical methods. The Highway Drainage Manual (DNIT, 2006) has no references for stepped spillway design. The Skimming flow and Nappe flow methods were used for the hydraulic design of step structures based on experiments found in the bibliography. This work aimed to investigate the design methodologies for stepped spillways based on the reference published in the Highway Drainage Manual (DNIT, 2006). It was verified in the diagnosis that it is necessary to change the geometry of the devices because the current sections are insufficient according to the hydraulic analysis using the Skimming flow and the Nappe flow. Thus, based on the analysis carried out in this research, efforts are needed to revise the Highway Drainage Manual (DNIT, 2006).*

KEYWORDS: *stepped spillways; Skimming flow; Nappe flow; highway drainage.*

Submetido em 27/05/2023 e aceito em 14/08/2023.
https://doi.org/10.70859/2764-9539.v2.n2.59

1 INTRODUÇÃO

No âmbito do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) as descidas d'água são definidas como dispositivos que possibilitam o escoamento das águas conduzidas pelas sarjetas, meios-fios, valetas, bueiros ou galerias, e que vertem sobre os taludes de corte ou aterros (DNIT, 2004). Em cortes, as descidas d'água conduzem a água coletada pelas valetas ou sarjetas, quando atingem seu comprimento crítico, desaguando numa caixa coletora ou na sarjeta de corte (DNIT, 2006). Nos aterros, conduzem as águas provenientes das sarjetas ou meios-fios, quando é atingido seu comprimento crítico até os pontos baixos, desaguando no terreno natural (DNIT, 2006) ou a jusante de bueiros e galerias, quando necessário. De acordo com o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), a escolha das descidas d'água, entre o tipo rápido ou em degraus, depende da necessidade de dissipação de energia e da velocidade do escoamento, parâmetros que estão relacionados à altura e declividade do talude.

No tocante ao dimensionamento hidráulico, o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) estabelece que as descidas d'água podem ser dimensionadas pelo método do perfil da linha d'água (escoamento gradualmente variado) ou pelo método empírico.

O perfil da linha d'água pode ser computado pela metodologia do método do passo direto - *Direct Step Method* ou pelo método do passo padrão - *Standard Step Method* (Chow, 1971). Por sua vez, o método empírico consiste na determinação da largura da descida e da altura da parede do canal, com base na vazão, utilizando uma equação análoga à de um vertedor.

Um dos problemas associados ao subdimensionamento de estruturas hidráulicas em degraus é a ocorrência de erosão nas laterais e a jusante do dispositivo. Isto pode ser evidenciado por algumas ocorrências de campo (Figura 1).

Figura 1 – Erosão em descidas d'água em degraus (a) Erosão nas bordas e (b) Erosão nas bordas e a jusante

Fonte: Consórcio Skill/MPB (2019)

Para o dimensionamento hidráulico de estruturas em degraus, a literatura apresenta alguns estudos, como os experimentos realizados por Essery e Horner (1971) e Sorensen (1985) *apud* Rajaratnam1990), aplicados em vertedouros em degraus, cujo enfoque principal caracteriza-se por avaliar o potencial de dissipação de energia nesses dispositivos. De acordo com esses experimentos, o escoamento nesses dispositivos pode ser dividido em duas classes que estão associadas às vazões de concentração sobre eles: o escoamento *Nappe flow* (em quedas sucessivas) e o *Skimming flow* (deslizante sobre turbilhões).

O regime Nappe flow caracteriza-se pela formação de ressaltos nos degraus, e o *Skimming flow*, por sua vez, possui a formação de turbilhonamento (Rajaratnam, 1990). Portanto, o comportamento hidráulico destes regimes de escoamento não é representado pelas equações convencionais do regime de escoamento gradualmente variado ou pela fórmula de Manning.

O objetivo deste trabalho foi investigar as metodologias de dimensionamento das descidas d'água em degraus publicadas no Álbum de Dispositivos de Drenagem - Publicação IPR 736 (DNIT, 2018) com base no referencial publicado no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006).

Utilizou-se para simulação hidráulica o software livre SISCCOH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos desenvolvido em Visual Basic.NET pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG - Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos - EHR (UFMG, 2019), com base nas condições de contorno da capacidade hidráulica dos dispositivos de montante.

Neste caso, os dispositivos de montante são os modelos de meios-fios, sarjetas, valetas e bueiros funcionando como canal que estão publicados no Álbum de Dispositivos de Drenagem (DNIT, 2018) e sua Emenda 1 (DNIT, 2022).

2 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DAS DESCIDAS D'ÁGUA

Nesta seção serão descritos e analisados os métodos de dimensionamento empírico e o método do perfil da linha d'água que estão indicados no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), bem como os métodos *Skimming flow* e *Nappe flow* apresentados na literatura conforme mencionado anteriormente.

2.1 MÉTODO EMPÍRICO

O método empírico consiste na utilização de uma equação análoga à de um vertedor para o cálculo das dimensões da descida d'água. Para utilização do método empírico, fixa-se o valor da largura da base da descida e determina-se a altura da seção por meio da Equação 1 (DNIT, 2006):

$$Q = 2{,}07.\ L^{0,9}.\ H^{1,6} \quad (1)$$

Onde:

Q é a vazão de projeto a ser conduzida em m³/s;

L é a largura da descida em m;

H é a altura média das paredes em m.

Para determinação da velocidade no pé da descida, no método empírico, utiliza-se a Equação 2 (DNIT, 2006):

$$V_b = \sqrt{2.g.h_{aterro}} \quad (2)$$

Onde:

V_b é a velocidade no pé da descida em m/s;

g é a aceleração gravitacional m/s²;

h_{aterro} é a altura do aterro em m.

Com base no cálculo da velocidade no pé da descida, V_b, determina-se o dispositivo de amortecimento de energia e finaliza-se o dimensionamento.

Ao aferir as alturas de parede calculadas com base no método empírico, verifica-se que este superdimensiona as estruturas hidráulicas e apresenta uma aproximação inexata da velocidade final do escoamento, podendo afetar o dimensionamento de dissipadores de energia.

2.2 MÉTODO DO PERFIL DA LINHA D'ÁGUA

Para o segundo método preconizado pelo Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), deve-se determinar o perfil da linha d'água, considerando o regime de escoamento gradualmente variado. A determinação do perfil da

linha d'água em canais sob o regime de escoamento gradualmente variado pode ser realizado pelo "*Standard Step Method*" - Método do Passo Padrão ou pelo "*Direct Step Method*" - Método do Passo Direto (Porto, 2006).

Primeiramente, para o cálculo com o método do passo direto, determina-se a declividade da linha de energia, Equação 3 (Ven Te Chow, 1971):

$$I_f = \left(\frac{Q.n}{A.R_h^{2/3}}\right)^2 \quad (3)$$

Onde:

Q é a vazão em m³/s;

I_f é a declividade da linha de energia em m/m;

n é a rugosidade de Manning adimensional;

A é a área da Seção em m²;

R_h é o raio hidráulico em m.

Com a determinação da declividade da linha de energia, verifica-se o regime de fluxo, este pode ser crítico, subcrítico ou supercrítico, a depender do número de Froude e da declividade do canal. A determinação da profundidade do regime crítico para canais retangulares é realizada pela Equação 4 (Chanson, 2004):

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g.b^2}} \quad (4)$$

Onde:

y_c é a profundidade crítica em m;

Q é a vazão em m³/s;

g é a aceleração gravitacional de 9,81 m/s²;

b é a largura da descida d'água em m..

A definição da profundidade em regime normal é realizada iterativamente de modo a satisfazer a Equação 5 (Akan, 2006):

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \frac{(b.\ y_n)^{5/3}}{(b+2y_n)^{2/3}} . I^{1/2} \quad (5)$$

Onde:

Q é a vazão em m³/s;

y_n é a profundidade normal em m;

I é a declividade do canal em m/m;

n é a rugosidade de Manning;

b é a largura da descida, seção retangular em m.

Conforme o Manual de Drenagem (DNIT, 2006) a seção de controle do escoamento na descida d'água está na entrada d'água, logo, assume-se que a água entrará na descida, na profundidade crítica *"y_c"*. Desta forma, tem-se a configuração do perfil d'água em escoamento supercrítico, onde a variação do perfil tende a profundidade de escoamento normal *"y_n"*.

Ao analisar a metodologia discorrida neste item, não é citada a adoção de um coeficiente de rugosidade de Manning diferenciado para se considerar o dimensionamento da descida em degraus. Portanto, mesmo que se tenha a possibilidade de realizar o dimensionamento por esta metodologia, não há uma referência de parâmetros para fazê-lo.

O parâmetro de rugosidade de Manning para esta metodologia pode ser obtido experimentalmente conforme ressaltado por Ghare (2005). O autor desenvolveu modelos reduzidos de descidas em degraus, onde apresentaram-se resultados de rugosidade de Manning para os degraus variando de 0,0324 a 0,0900.

Ao testar as vazões das descidas em degraus, de maneira a se obter o perfil da linha d'água considerando a rugosidade obtida experimentalmente por Ghare (2005) e a profundidade crítica como seção de controle de montante, observou-se que altas rugosidades alteram o comportamento da linha de energia, que tende a apresentar uma maior declividade. Desta forma, ao invés de uma tendência decrescente da lâmina de escoamento, partindo da profundidade crítica tendendo a profundidade normal, tem-se um resultado crescente da lâmina de escoamento.

Portanto, o comportamento do perfil da linha d'água, considerando-se uma maior rugosidade para representar o efeito dos degraus, não representa o comportamento do escoamento em degraus, conforme pode ser visualizado nos modelos experimentais retratados na Figura 2.

Figura 2 – Modelos experimentais de escoamento em degraus (a) *Nappe flow*, (b) *Skimming flow*

Fonte: Chanson *et al.* (2015)

Com o avanço das pesquisas no âmbito do regime de escoamento em degraus, existem softwares que foram desenvolvidos com maior acurácia para determinação dos parâmetros hidráulicos necessários para o dimensionamento das descidas de água em degraus, que conforme destacado na Figura 2, apresenta a formação de turbilhões e ressaltos.

Nas subseções a seguir serão descritas as metodologias *Skimming flow* e *Nappe flow*, desenvolvidas especificamente para representar o comportamento do escoamento em degraus.

2.3 METODOLOGIA *SKIMMING FLOW* E *NAPPE FLOW*

Em descidas d'água em degraus se desenvolvem duas tipologias de escoamento, a depender da vazão de projeto, da geometria do canal e dos degraus, o *Skimming flow e o Nappe flow* (Chanson, 2004).

No regime de escoamento *Nappe flow* (ressaltos sucessivos) o fluxo de cada degrau atinge o degrau abaixo como um jato descendente, com a dissipação de energia ocorrendo pela quebra do jato no ar, com ou sem formação de ressalto hidráulico parcial no degrau. No regime de escoamento *Skimming flow* (turbilhão deslizante) a água desliza sobre os degraus e sua energia é amortecida pelo turbilhão recirculante preso entre os degraus. A dissipação de energia aumenta com a transferência de momento para o fluido recirculante no turbilhão (Rajaratnam, 1990).

Para diferenciar a ocorrência entre os dois tipos de escoamento, *Skimming flow* ou *Nappe flow,* calcula-se a profundidade crítica tendo-se em mãos a vazão de projeto, largura do canal, e logo após determina-se o comprimento e altura do degrau (Chanson, 2004), conforme Equações 6 e 7:

$$\frac{d_c}{h} > 1{,}20 - 0{,}325.\left(\frac{h}{l}\right) \quad (6)$$

$\rightarrow Skimming\ flow$

$$\frac{d_c}{h} < 0{,}89 - 0{,}4.\left(\frac{h}{l}\right) \quad (7)$$

$\rightarrow Nappe\ flow\ , limite\ superior, sem\ ressalto$

Onde:

d_c é a profundidade crítica em m;

h é a altura do degrau em m;

l é ocomprimento do degrau em m.

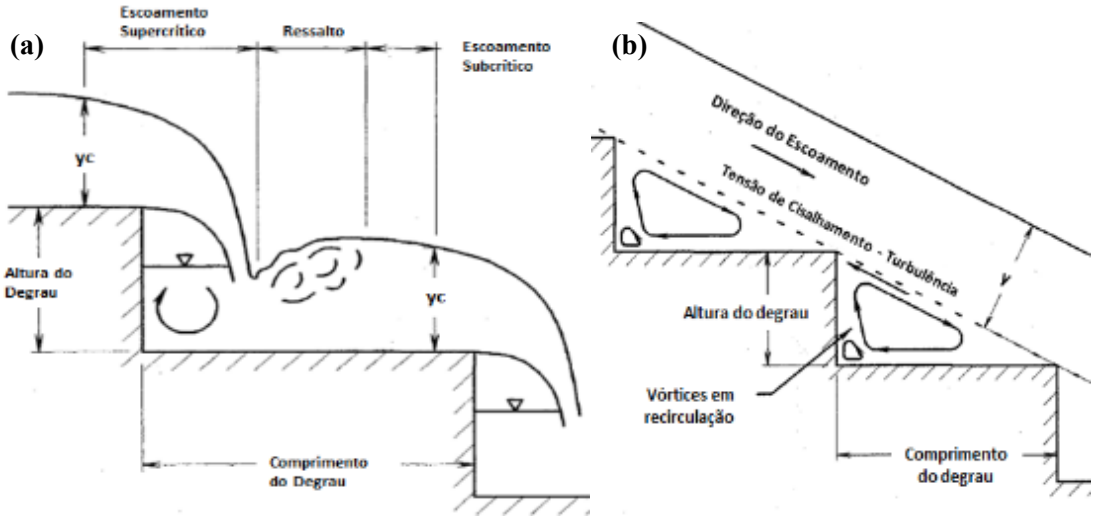
Caso o regime de escoamento não se enquadre nas condições de contorno das inequações (6) e (7), este é nomeado de regime de transição. Para evitar a formação do regime de

transição deve-se alterar os parâmetros geométricos das seções para se obter os regimes *Skimming flow* ou *Nappe flow*.

O regime de transição apresenta a formação de cavidades de ar nos degraus com efeito indesejado às estruturas hidráulicas (UFMG, 2019), além da formação de turbilhões e respingos d'água que transbordam as paredes laterais das descidas.

A ilustração do diferencial entre os dois regimes de escoamento supracitados está demonstrada na Figura 3.

Figura 3 – Regimes de escoamento (a) *Nappe flow* e (b) *Skimming flow*



Fonte: USBR (2002)

O método de cálculo do *Nappe flow* em comparação ao método *Skimming*, possui um desenvolvimento matemático simplificado. Para ambos os métodos o primeiro parâmetro de entrada é a profundidade crítica do escoamento que pode ser obtida pela Equação 8 (Chanson, 2004):

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g.b}} \qquad (8)$$

Onde:

d_c é a profundidade crítica do escoamento em m;

g é aaceleração gravitacional de 9,81 m/s²;

b é a largura do canal da descida d'água em m.

O desenvolvimento do dimensionamento pelo método *Nappe flow*, requer a verificação da formação do ressalto nos degraus (Tomaz, 2019), e após prossegue-se com o cálculo da geometria do escoamento, em função da profundidade crítica e altura dos degraus.

De modo a verificar se haverá a formação do ressalto hidráulico no regime *Nappe flow*, realiza-se as verificações contidas nas Equações 09 a 11 (Tomaz, 2019):

$$NA_1\ (Ressalto\ completo) \rightarrow \frac{d_c}{h} \leq 0{,}0916\,.\left(\frac{h}{l}\right)^{-1{,}276} \qquad (9)$$

$$NA_2\ (Ressalto\ parcial) \rightarrow \frac{d_c}{h} > 0{,}0916.\left(\frac{h}{l}\right)^{-1{,}276} \qquad (10)$$

$$NA_3(Sem\ ressalto) \rightarrow \frac{d_c}{h} < 0{,}89 - 0{,}4\,\left(\frac{h}{l}\right) \qquad (11)$$

Onde:

d_c é a profundidade crítica em m;

h é a altura do degrau em m;

l é o comprimento do patamar do degrau em m.

A correlação obtida para descrever a ocorrência do ressalto completo foi desenvolvida por Chanson (1994) para o seguinte intervalo, conforme Equação 12:

$$0{,}2 \leq \frac{h}{l} \leq 6 \qquad (12)$$

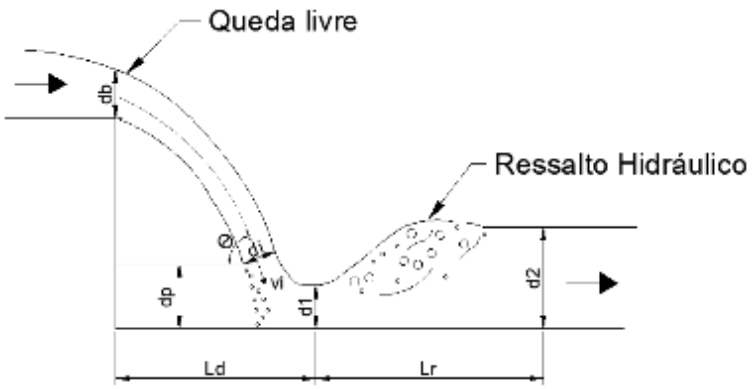
Para verificar o limite de ocorrência do *Nappe flow*, o valor da relação da profundidade crítica

com a altura do degrau deve respeitar a condição apresentada na Equação 13 (Tomaz, 2019):

$$\frac{d_c}{h} < \frac{0{,}8593}{\left(\frac{h}{l} + 0{,}139\right)^{0{,}394}} \quad (13)$$

Após examinar a condição de ocorrência do *Nappe flow*, procede-se com o cálculo da geometria do escoamento *Nappe flow*, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Geometria do *Nappe flow*



Fonte: Adaptado de Chanson (1994)

Os parâmetros são calculados por meio das Equações 14 a 22 (Chason, 1994):

$$d_b = 0{,}715 . d_c \quad (14)$$

$$\frac{d_1}{h} = 0{,}54 . \left(\frac{d_c}{h}\right)^{1{,}275} \quad (15)$$

$$\frac{d_2}{h} = 1{,}66 . \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0{,}81} \quad (16)$$

$$\frac{d_p}{h} = \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0{,}66} \quad (17)$$

$$\frac{L_d}{h} = 4{,}30 . \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0{,}81} \quad (18)$$

$$\frac{d_i}{d_c} = 0{,}687 . \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0{,}483} \quad (19)$$

$$\frac{V_i}{V_c} = 1{,}455 . \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0{,}483} \quad (20)$$

$$\tan \varphi = 0{,}838 . \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0{,}586} \quad (21)$$

$$\frac{L_r}{d_1} = 8 . (Fr - 1{,}5) \quad (22)$$

Onde:

d_b é a profundidade do escoamento na extremidade do degrau antes da queda livre em m;

d_c é a profundidade crítica em m;

d_1 é a profundidade do início do ressalto em m;

d_2 é a profundidade do ressalto em m;

h é a altura do degrau em m;

d_p é a profundidade do escoamento na face do degrau após a queda livre em m;

L_d é o comprimento do início do ressalto em m;

d_i é a profundidade do jato em queda livre em m;

V_i é a velocidade do jato em queda livre em m/s;

V_c é a velocidade crítica em m/s;

φ é o ângulo de queda do jato em graus;

L_r é o comprimento do ressalto em m;

Fr é o número de Froude adimensional.

Os parâmetros calculados pelas Equações 14 a 22 repetem-se nas quedas sucessivas nos degraus. Para o cálculo da energia total dissipada pelo regime de escoamento *Nappe flow* utilizam-se as Equações 23 a 26 (Chamani e Rajaratnam, 1994):

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{\left\{(1-\alpha)^N . \left[1 + 1{,}5 . \left(\frac{d_c}{h}\right)\right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1-\alpha)^i\right\}}{N + 1{,}5 . \left(\frac{d_c}{h}\right)} \quad (23)$$

$$\propto = a - b . \log\left(\frac{d_c}{h}\right) \quad (24)$$

$$a = 0{,}30 - 0{,}35 . \left(\frac{h}{l}\right) \quad (25)$$

$$b = 0{,}54 + 0{,}27.\left(\frac{h}{l}\right) \quad (26)$$

Onde:

ΔE é a dissipação de energia na escada hidráulica em m;

E_0 é a energia específica no pé da escada hidráulica em m;

N é o número de degraus;

$\propto$ é a proporção de energia dissipada por degrau adimensional;

d_c é a profundidade crítica em m;

h é a altura do degrau em m;

a, b são os coeficientes adimensionais.

Os cálculos subsequentes para determinação do comportamento do escoamento em regime *Skimming flow* são dependentes da declividade angular do topo da descida, θ em graus, da altura do corte ou do aterro, do fator de fricção, da concentração média de ar do escoamento aerado e do comprimento de incipiência.

Para o cálculo destes parâmetros é utilizada a metodologia de Ohtsu *et al*. (2004), implementada no Sistema para Cálculo de Componentes Hidráulicos – SISCCOH da UFMG (2019), para descidas em degraus com θ > 19°, que são os casos dos projetos-tipo da Publicação IPR 736 (DNIT, 2018).

Após o cálculo da profundidade crítica determina-se o valor do parâmetro adimensional da relação da altura da escada com a profundidade crítica do escoamento pela Equação 27 (Ohtsu *et al.*, 2004):

$$P = \frac{H_{dam}}{d_c} \quad (27)$$

Onde:

H_{dam} é a altura da descida em degraus em m;

d_c é a profundidade crítica em m.

Logo após determina-se a altura da queda relativa para formação do escoamento quase-uniforme, Equação 28 (Ohtsu *et al.*, 2004):

$$\frac{H_e}{d_c} = (-1{,}21.10^{-5}.\theta^3 + 1{,}60.10^{-3}.\theta^2 - 7{,}13.10^{-2}.\theta + 1{,}30)^{-1}\left\{5{,}7 + 6{,}7\exp\left(-6{,}5\frac{S}{d_c}\right)\right\} \quad (28)$$

Onde:

H_e/d_c é a altura da queda relativa em m;

θ é o ângulo do fundo da descida em degraus em graus;

S é a altura do degrau em m;

d_c é a profundidade crítica em m.

Posteriormente é realizada a verificação da formação do escoamento quase-uniforme. Caso a altura relativa da queda seja inferior ao parâmetro da altura da descida em relação à profundidade crítica, é formado o regime de escoamento quase-uniforme, caso contrário não há a formação desse regime e prossegue-se com o cálculo por uma rota alternativa. O fluxograma das alternativas de cálculo para as condições supracitadas está disposto na Figura 5.

Para calcular o comprimento da descida d'água onde inicia o escoamento aerado (ponto de incipiência), utilizam-se as Equações 29 a 31 (Boes & Hager, 2003).

$$L_i = \frac{5{,}90.y_c^{\frac{6}{5}}}{\left((sen\theta)^{\frac{7}{5}}.h^{\frac{1}{5}}\right)} \quad (29)$$

$$h_{m,i} = 0{,}40.F^{0.6} \quad (30)$$

$$F = q/(g\ sen\theta\ h^3)^{0{,}5} \quad (31)$$

Onde:

L_i é o comprimento do início da aeração em m;

y_c é a profundidade crítica em m;

θ é a declividade angular da escada em graus;

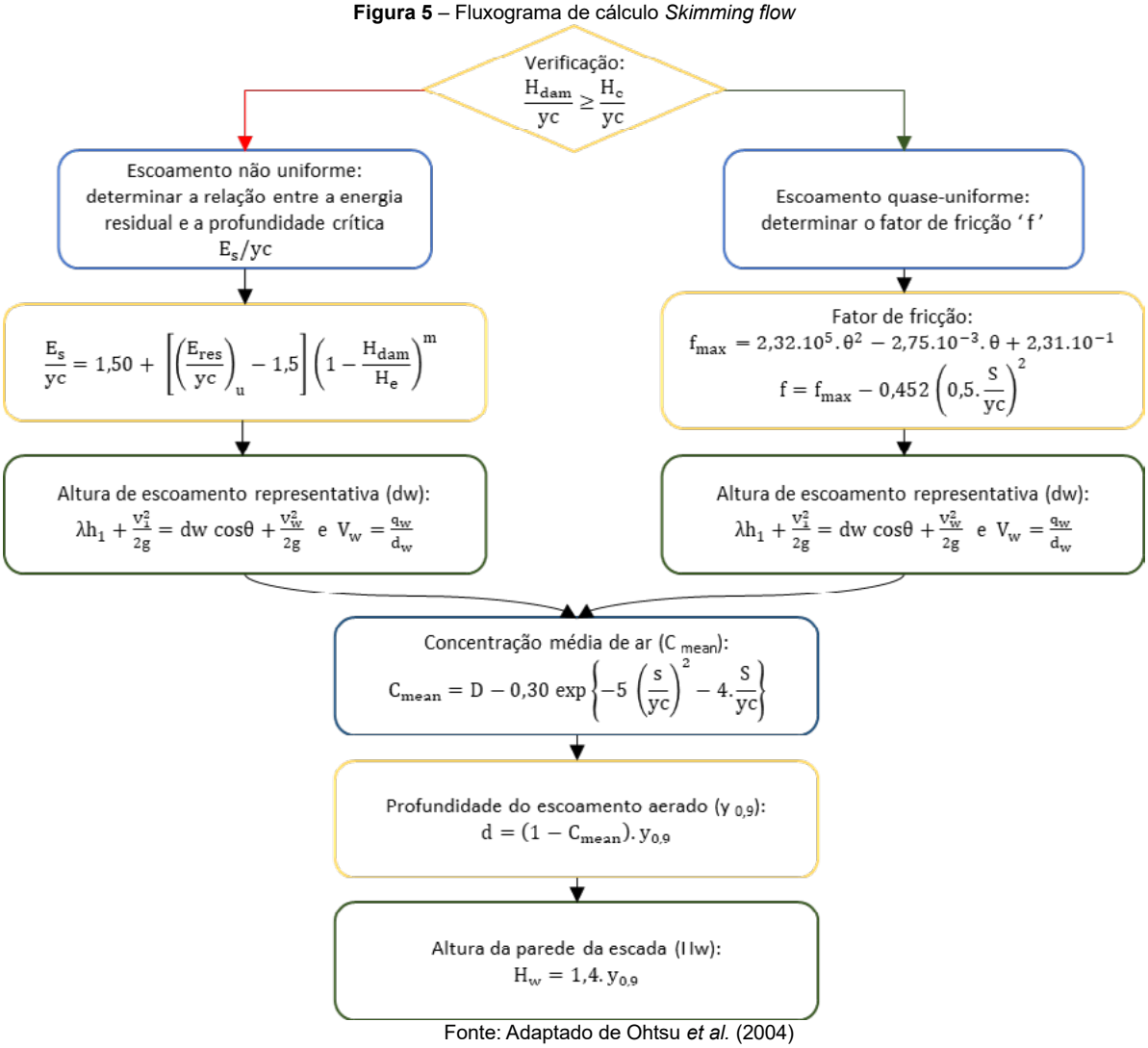
h é a altura do degrau em m;

$h_{m,i}$ é a profundidade ar + água em m;

F é o Froude adimensional;

g é a aceleração gravitacional em m/s².

Figura 5 – Fluxograma de cálculo *Skimming flow*



Fonte: Adaptado de Ohtsu *et al.* (2004)

A concentração média de ar no escoamento é dada pela Equação 32 (Ohtsu *et al.*, 2004):

$$C_{mean} = D - 0{,}30\exp\left\{-5.\left(\frac{S}{d_c}\right)^2 - 4\left(\frac{S}{d_c}\right)\right\} \qquad (32)$$

Onde:

C_{mean} é a concentração média de ar - razão adimensional;

S é a altura do degrau em m;

d_c é a profundidade crítica em m;

D é o fator em função da declividade da descida d'água.

Logo após a determinação do ponto de incipiência, da profundidade representativa do escoamento e da profundidade final do escoamento, finaliza-se o processo de dimensionamento pelo regime *Skimming flow*.

Com base na análise da metodologia, verificou-se que a altura da parede do canal é calculada com 40% de folga em relação à altura do escoamento aerado, no entanto, para adotar uma folga menos conservadora, considerou-se nos cálculos realizados nesta pesquisa uma folga de 10% em relação à profundidade do escoamento aerado.

3 VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DAS DESCIDAS EM DEGRAUS PELO MÉTODO *SKIMMING FLOW* E *NAPPE FLOW*

Para avaliar a eficiência hidráulica das descidas em degraus pelo método *Skimming flow* utilizou-se o *software* livre SISCCOH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos

desenvolvido em Visual Basic.NET pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG - Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos - EHR (UFMG, 2019), com base nas condições de contorno da capacidade hidráulica dos dispositivos de montante. Para avaliar os dispositivos sujeitos ao *regime Nappe flow* realizou-se o cálculo passo a passo, manualmente, por meio das Equações 09 a 26.

Para realização das simulações das descidas d'água em degraus, adotou-se como condições de contorno:

1) As vazões dos dispositivos de montante, quais sejam meios-fios, sarjetas e valetas da Emenda 1 do Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem (DNIT, 2022); e
2) As vazões críticas dos bueiros funcionando como canal, conforme Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006).

Primeiramente, realizou-se a verificação do enquadramento das vazões no regime de escoamento *Skimming flow ou Nappe flow* e o diagnóstico da situação atual da geometria das descidas d'água indicadas no Álbum, Publicação IPR 736 (2018).

Calculou-se a capacidade de vazão das seções atuais publicadas no Álbum (DNIT, 2018), e comparou-se com as vazões dos dispositivos de montante de forma a verificar se o dispositivo apresenta suficiência hidráulica para condução do escoamento.

Para determinar a altura da parede da descida necessária para acomodar o escoamento em regime *Skimming flow ou Nappe flow* calculou-se a profundidade do escoamento aerado para as alturas de corte e aterro, variando de 3 a 8 metros de altura, considerando os 8 metros como altura máxima para o escalonamento do talude em conformidade ao Manual de Implantação Básica de Rodovia – Publicação IPR 742 (DNIT, 2010).

Houve o cuidado de se observar a ocorrência do escoamento aerado dentro dos comprimentos das descidas, pois, por vezes, o ponto de incipiência pode iniciar após o comprimento total da descida.

O resultado das verificações hidráulicas para as vazões das valetas de proteção de corte, adaptáveis as descidas de cortes em degraus, está disposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Verificação do regime de escoamento para as vazões das valetas de proteção de corte em revestimento vegetal

Parâmetros	VPCG 120-30	VPCG 160-30
Declividade longitudinal da valeta (m/m)	0,01	0,01
Rugosidade de Manning	0,025	0,025
Vazão de Projeto (m³/s)	0,29	0,46
Regime de Escoamento (DCD 01/02)	Transição	*Skimming flow*
Capacidade vazão (DCD 01/02) (m³/s)	0,15	0,15
Regime de Escoamento (DCD 03/04)	Transição	Transição
Capacidade vazão (DCD 03/04) (m³/s)	0,20	0,20
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,20	0,20
Altura da parede proposta (m)	0,40	0,30
Largura da base proposta (m)	0,40	0,60
Regime de escoamento seção proposta	*Skimming flow*	*Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Nota-se pela Tabela 1 que para obtenção do regime de escoamento *Skimming flow* para as descidas de corte com as vazões das valetas em revestimento vegetal é necessária a alteração dos parâmetros geométricos da seção transversal. Outrossim, verificou-se que o dispositivo publicado não possui capacidade de vazão suficiente para conduzir o escoamento contribuinte das valetas de proteção de corte em revestimento vegetal.

Para as descidas d'água adaptáveis às valetas de proteção de corte com revestimento de concreto a montante, as Tabelas 2 e 3 demonstram que também há necessidade de alteração na geometria das descidas.

Tabela 2 – Verificação do regime de escoamento para as vazões das valetas de proteção de corte em revestimento de concreto - VPCC 120-30

Parâmetros	VPCC 120-30			
Declividade longitudinal da valeta (m/m)	0,01	0,02	0,03	0,04
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015	0,015
Capacidade da Valeta (m³/s)	0,49	0,69	0,84	0,97
Regime de Escoamento (DCD 01/02)	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow
Capacidade vazão (DCD 01/02) (m³/s)	0,15	0,15	0,15	0,15
Regime de Escoamento (DCD 03/04)	Transição	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow
Capacidade vazão (DCD 03/04) (m³/s)	0,20	0,20	0,20	0,20
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,20	0,20	0,20	0,20
Altura da parede proposta (m)	0,30	0,40	0,40	0,40
Largura da base proposta (m)	0,60	0,80	0,80	0,80
Regime de escoamento seção proposta	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow

[a] SK: Skimming flow

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 – Verificação do regime de escoamento para as vazões das valetas de proteção de corte em revestimento de concreto - VPCC 160-30

Parâmetros	VPCC 160-30			
Declividade longitudinal da valeta (m/m)	0,01	0,02	0,03	0,04
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015	0,015
Capacidade da Valeta (m³/s)	0,77	1,09	1,33	1,53
Regime de Escoamento (DCD 01/02)	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow
Capacidade vazão (DCD 01/02) (m³/s)	0,15	0,15	0,15	0,15
Regime de Escoamento (DCD 03/04)	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow
Capacidade vazão (DCD 03/04) (m³/s)	0,20	0,20	0,20	0,20
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,20	0,20	0,20	0,20
Altura da parede proposta (m)	0,40	0,50	0,50	0,50
Largura da base proposta (m)	0,80	1,00	1,00	1,00
Regime de escoamento seção proposta	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow	SK[a] flow

[a] SK: Skimming flow

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que para as vazões acima de 1 m³/s, recomenda-se a utilização de uma descida com base de 1,00 m, visto que para a descida com base de 0,80 m as alturas de parede necessárias para acomodação do fluxo são superiores as publicadas.

Ressalta-se de posse aos resultados obtidos que a altura das paredes atualmente publicada no Álbum de Dispositivos (DNIT, 2018) é insuficiente para as vazões de projeto das valetas de proteção de corte.

Para as descidas de aterro em degraus adaptáveis às sarjetas com largura total até 1 metro e aos meios-fios, existe a ocorrência do regime *Nappe flow*. Os resultados do diagnóstico hidráulico das sarjetas STC 80-15 e STC 100-20, bem como para o meio-fio MFC 01, com alagamento temporário do acostamento, em greide contínuo e ponto baixo, estão demonstrados nas Tabelas 4 a 9.

Nessa situação, calculou-se a formação do ressalto parcial do *Nappe flow*, e a altura relativa do escoamento final considerando a fração de formação do ressalto completo como referência. Para os dispositivos onde atingiu-se o *escoamento Skimming flow* em ponto baixo, realizou-se a análise da altura do escoamento aerado. Verificou-se que, para padronização dos dispositivos adaptáveis a sarjetas e meios-fios, seria interessante a adoção de uma parede com

altura de 36 cm, que atenderia ambos os regimes de escoamento. No cálculo da altura da parede, adotou-se o mesmo critério de 10% em relação à profundidade do escoamento calculado.

Tabela 4 – Verificação do regime de escoamento para as vazões do meio-fio MFC 01 em greide contínuo

Parâmetros	MFC 01 – Com Alagamento – Greide Contínuo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,10	0,20	0,26
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP[a] flow	NP[a] flow	Transição
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP[a] flow	NP[a] flow	NP[a] flow

[a] NP: Nappe flow

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 – Verificação do regime de escoamento para as vazões do meio-fio MFC 01 em ponto baixo

Parâmetros	MFC 01 – Com Alagamento – Ponto Baixo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,20	0,40	0,52
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP[a] flow	SK[b] flow	SK[b] flow
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP[a] flow	Transição	SK[b] flow

[a] NP: Nappe flow e *[b] SK: Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 – Verificação do regime de escoamento para as vazões da sarjeta STC 80-15 em greide contínuo

Parâmetros	STC 80-15 – Greide Contínuo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,05	0,10	0,13
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP[a] flow	NP[a] flow	NP[a] flow
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP[a] flow	NP[a] flow	NP[a] flow

[a] NP: Nappe flow

Fonte: Elaboração própria

Tabela 7 – Verificação do regime de escoamento para as vazões da sarjeta STC 80-15 em ponto baixo

Parâmetros	STC 80-15 – Ponto baixo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,10	0,20	0,27
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP[a] flow	NP[a] flow	Transição
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP[a] flow	NP[a] flow	NP[a] flow

[a] NP: Nappe flow

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 – Verificação do regime de escoamento para as vazões da sarjeta STC 100-20 em greide contínuo

Parâmetros	STC 100-20 – Greide Contínuo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,10	0,20	0,27
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP[a] flow	NP[a] flow	Transição
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP[a] flow	NP[a] flow	Transição

[a] NP: Nappe flow

Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 – Verificação do regime de escoamento para as vazões da sarjeta STC 100-20 em ponto baixo

Parâmetros	STC 100-20 – Ponto Baixo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,20	0,40	0,54
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP[a] flow	SK[b] flow	SK[b] flow
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP[a] flow	Transição	SK[b] flow

[a] NP: Nappe flow e *[b] SK: Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Para as descidas de aterro em degraus adaptáveis aos bueiros tubulares, os resultados das verificações hidráulicas e os diagnósticos estão dispostos nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 – Verificação do regime de escoamento para as vazões dos bueiros tubulares funcionando como canal - BSTC 60, BSTC 80 e BSTC 100.

Parâmetros	BSTC 60	BSTC 80	BSTC 100
Vazão Crítica (m³/s)	0,43	0,88	1,53
Descida em degraus atual	DAD 03/04	DAD 05/06	DAD 07/08
Regime de Escoamento atual	NP[a]	Transição	SK[b] flow
Capacidade de vazão da seção atual (m³/s)	0,12	0,39	1,25
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,20	0,25
Altura da parede proposta (m)	0,26	0,30	0,35
Largura da base publicada (2018) (m)	1,10	1,40	1,70
Largura da base proposta (m)	1,10	1,25	1,70
Regime de escoamento seção proposta	NP[a]	SK[b] flow	SK[b] flow

[a] NP: Nappe flow e *[b] SK: Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11 – Verificação do regime de escoamento para as vazões dos bueiros tubulares funcionando como canal - BSTC 120, BSTC 150 e BDTC 100

Parâmetros	BSTC 120	BSTC 150	BDTC 100
Vazão Crítica (m³/s)	2,42	4,22	3,07
Descida em degraus atual	DAD 09/10	DAD 11/12	DAD 13/14
Regime de Escoamento atual	SK[b] flow	SK[b] flow	SK[b] flow
Capacidade de vazão da seção atual (m³/s)	2,35	2,90	2,80
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,35	0,35	0,30
Altura da parede proposta (m)	0,40	0,54	0,36
Largura da base publicada (2018) (m)	2,00	2,40	2,90
Largura da base proposta (m)	2,00	2,40	2,90
Regime de escoamento seção proposta	SK[b] flow	SK[b] flow	SK[b] flow

[b] SK: Skimming flow

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 – Verificação do regime de escoamento para as vazões dos bueiros tubulares funcionando como canal - BDTC 120 e BDTC 150

Parâmetros	BDTC 120	BDTC 150
Vazão Crítica (m³/s)	4,84	8,45
Descida em degraus atual	DAD 15/16	DAD 17/18
Capacidade de vazão da seção atual (m³/s)	4,25	6,10
Regime de Escoamento atual	SK[b] flow	SK[b] flow
Altura da parede publicada (m)	0,35	0,40
Altura da parede proposta (m)	0,45	0,55
Largura da base publicada (2018) (m)	3,40	4,10
Largura da base proposta (m)	3,40	4,10
Regime de escoamento seção proposta	SK[b] flow	SK[b] flow

[b] *SK: Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

De acordo com as tabelas 10, 11 e 12, verificou-se a necessidade de aumentar a altura das paredes laterais das descidas d'água de aterros em degraus adaptáveis aos bueiros, em atendimento à análise hidráulica pelo regime *Skimming flow e Nappe flow.* Ademais, verificou-se que a capacidade hidráulica da seção atualmente no Álbum (DNIT, 2018) está aquém de atender a vazão dos bueiros funcionando como canal.

Com base nos resultados dos diagnósticos performados em relação às descidas d'água em degraus publicadas no Álbum (DNIT, 2018), verificou-se que as seções são hidraulicamente insuficientes, devendo estas serem alvo de revisão.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foram apresentadas as metodologias de dimensionamento de descidas d'água com enfoque nas descidas em degraus. Foram analisados os métodos preconizados no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) e os métodos *Skimming flow* e *Nappe flow*.

Constatou-se que o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) não indica referências específicas para o dimensionamento de descidas em degraus, induzindo que estas sejam consideradas como estruturas hidráulicas de macrorrugosidades e sendo dimensionadas pela fórmula de Manning. No entanto, esta aproximação pela fórmula de Manning não é recomendada para o dimensionamento de descidas em degraus (Tomaz, 2011).

O dimensionamento de descidas em degraus por uma aproximação com Manning pode acarretar subdimensionamento ou superdimensionamento a depender das condições de contorno podendo justificar problemas de erosão nas laterais e a jusante das estruturas hidráulicas.

Ao analisar a metodologia proposta pelo Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) verificou-se que o método empírico consiste na utilização de uma equação análoga à de um vertedor para o cálculo das dimensões da descida d'água, sendo esta uma aproximação grosseira ao analisar o comportamento gradualmente variado das descidas d'água tipo rápido e o comportamento dos regimes de escoamento das descidas em degraus.

Por sua vez, o método do perfil da linha d'água considera a ocorrência do regime de escoamento gradualmente variado, que descreve o comportamento hidráulico de descidas tipo rápido. No entanto, ao analisar a metodologia, não é citada a adoção de um coeficiente de rugosidade de Manning diferenciado para se considerar o dimensionamento da descida em degraus. Portanto, mesmo que se tenha a possibilidade de realizar o dimensionamento por

esta metodologia, não há uma referência de parâmetros para fazê-lo.

No entanto, ao testar o traçado do perfil da linha d'água considerando as vazões dos dispositivos, adotando-se uma rugosidade de Manning na ordem de 0,0800, observa-se que altas rugosidades alteram o comportamento da linha de energia, que tende a apresentar uma maior declividade. Dessa forma, ao invés de uma tendência decrescente da lâmina de escoamento, partindo da profundidade crítica tendendo à profundidade normal, tem-se um resultado crescente da lâmina de escoamento.

Portanto, o comportamento do perfil da linha d'água considerando-se uma maior rugosidade para representar o efeito dos degraus não representa o comportamento do escoamento em degraus.

Os experimentos que geraram as descrições do comportamento hidráulico dos regimes *Skimming flow* e *Nappe flow* tiveram um enfoque inicial no potencial de dissipação de energia de estruturas hidráulicas em degraus. De fato, o escoamento em degraus tende a reduzir as velocidades terminais ou controlar o seu aumento ao longo dos taludes.

Conforme abordado, as metodologias de cálculo dos regimes de escoamento diferenciam-se de acordo com suas características e parâmetros hidráulicos. O regime de escoamento *Skimming flow* (turbilhões deslizantes) é dependente do cálculo da declividade angular do topo da descida, da altura do corte ou do aterro, do fator de fricção, da concentração média de ar do escoamento aerado e do comprimento de incipiência.

Por sua vez, o desenvolvimento do dimensionamento pelo método *Nappe flow*, requer a verificação da formação do ressalto nos degraus (Tomaz, 2019) e após prossegue-se com o cálculo da geometria do escoamento, em função da profundidade crítica e altura dos degraus.

Ao verificar a eficiência hidráulica das descidas em degraus publicadas no Álbum de Dispositivos (DNIT, 2018), observou-se que a geometria publicada apresenta insuficiência hidráulica para o regime *Skimming flow* e *Nappe flow*, sendo necessária a revisão destes dispositivos.

Propôs-se um aumento das alturas das paredes laterais das descidas d'água em degraus para acomodar o fluxo de maneira a evitar a ocorrência de erosões nas laterais e a jusante.

Dessa forma, com base na análise realizada nesta pesquisa, destacam-se esforços necessários para revisão da metodologia de dimensionamento de descidas d'água em degraus no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) com a inclusão das metodologias de dimensionamento dos regimes *Skimming flow* e *Nappe flow* e fomentar a utilização de modelos computacionais livres a exemplo do SISCCOH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos desenvolvido em Visual Basic.NET pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG - Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos - EHR (UFMG, 2019) para o desenvolvimento e análise de projetos.

REFERÊNCIAS

AKAN, A. O. **Open Channel Hydraulics**. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann Elsevier, 2006.

BOES, R. M. & HAGER, W. H. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, Virginia - USA, v. 129, n. 9, p. 661-670, set. 2003.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Jet flow on stepped spillways. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, Virginia – USA, v. 120, n. 2, p. 254-259, fev. 1994.

CHANSON, H. **The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction - Basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures**. 2 ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann Elsevier, 2004.

CHANSON, H. Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways. **Australian Civil Engineering Transactions**, Sydney – AUD, v. CE36, n. 1, p. 69-76, 1994.

CHANSON, H.; BUNG, D. & MATOS, J. Stepped spillways and cascades. In: Chanson, H (org). **Energy Dissipation in Hydraulic Structures**. Netherlands: Taylor & Francis Group, 2015, p. 45-64.

CHOW, VEN TE. **Open-channel Hydraulics**. USA: McGraw-Hill Classic Textbook Reissue, 1971.

CONSÓRCIO SKILL/MPB ENGENHARIA. **RNC 044/LT-3.1**. Minas Gerais - MG: Skill/MPB Engenharia, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Norma DNIT 021/2004-ES - Drenagem - Entradas e descidas d'água - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Publicação IPR 724: Manual de Drenagem de Rodovias**. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Publicação IPR 742: Manual de implantação básica de rodovia**. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Publicação IPR 736: Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem**. 5 ed. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Publicação IPR 736: Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem – Emenda 1: Sarjetas, Valetas e Meios-fios**. Brasília, DF: IPR, 2022.

GHARE, A. D.; POREY, P. D. & INGLE, R. N. Experimental studies on frictional resistance of flow over stepped spillway. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, Maharashtra - IND, v. 11, n. 3, p. 47-56, 2005.

OHTSU, I.; YASUDA, Y. & TAKASHI, M. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, Virginia - USA, v. 130, n. 9, p. 860 – 869, set. 2004.

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

RAJARATNAM, N. Skimming flow in stepped spillways. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, Virginia - USA, v. 116, n. 4, p. 587-591, Abril 1990.

TOMAZ, P. **Escada hidráulica em obra de pequeno porte**. Guarulhos, SP: Plínio Tomaz Engenharia, 2011.

TOMAZ, P. **Escada hidráulica Nappe Flow**. Guarulhos, SP: Plínio Tomaz Engenharia, 2019. 70 slides, color.

UNITED STATES DEPARTMENT OF INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION – USBR. **Hydraulic design of stepped spillways**. Denver, Colorado: Water Resources Research Laboratory, 2002.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG. **Sistema para Cálculo de Componentes Hidráulicos - SISCCOH**. Baptista, M. B.; Coelho M. M. L. P.; Alexandre, G. R.; Barcelos, J. M. (desenvolvedores). Belo Horizonte, MG: Pimenta d'Ávila & UFMG, 2019.