

Análise de Falhas de Segurança e Funcionalidade em Dispositivos de Drenagem Rodoviária (DAD e DRH) em Resposta à uma Vazão Crítica

Diego Sebastian Carvalho de Souza¹; Thiago Sebastian Carvalho de Souza²; Alfredo Akira Ohnuma Junior³

✉ sebastian.diego@posgraduacao.uerj.br

1. Departamento de Engenharia Ambiental (DEAMB)/UERJ. Maracanã, Rio de Janeiro – Brasil.

2. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP)/UFF. Niterói, Rio de Janeiro – Brasil.

3. Departamento de Engenharia. Sanitária e Meio Ambiente (DESMA)/UERJ. Maracanã, Rio de Janeiro – Brasil.

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: Outubro de 2025

Aceito em: Novembro de 2025

Publicado em: Dezembro de 2025

Resumo: Sistemas de drenagem rodoviária projetados com IDFs estacionárias podem tornar-se insuficientes frente ao aumento recente das chuvas intensas. Este trabalho avaliou o desempenho de uma escada hidráulica (DAD) e de um canal de descida com bacia de resalto (DRH) na Rodovia Presidente Dutra (RJ), utilizando dados pluviométricos da ANA (1967-2025), desagregação de chuva e IDFs recalibradas para $TR=10$ anos e $t_c=5$ min. As vazões estimadas foram $Q=0,768 \text{ m}^3/\text{s}$ (DAD) e $Q=2,836 \text{ m}^3/\text{s}$ (DRH). Constatou-se que a DAD dissipou 85,5% da energia, mas é hidraulicamente instável ($B/Y_c=2,55 < 5$) e apresentou picos de dissipação de $11,530 \text{ W/m}^3$, com risco de cavitação. No DRH, estimou-se que o resalto requer uma profundidade a jusante de (y_3) de 3,65 m, excedendo a altura da bacia projetada (h_{bacia}) de 1,5 m. Isso gera um extravasamento (overflow) 2,15 m, implicando velocidade residual $\approx 12,5 \text{ m/s}$ e alto potencial erosivo. Assim, conclui-se pela necessidade de retrofit (alargamento de calha, aeração, redimensionamento da bacia com *end sill* e tipologia USBR), e pela adoção rotineira de IDFs não-estacionárias em programas de manutenção de drenagem rodoviária.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Dissipação de energia, Estruturas Hidráulicas, Retrofit, Barra Mansa.

Security and Functionality Failure Analysis in Road Drainage Devices (DAD and DRH) in Response to a Critical Flow Rate

Abstract: Road drainage systems designed using stationary IDF curves may become insufficient given the recent increase in intense rainfall. This study evaluated the performance of a hydraulic chute (DAD) and a descending channel with a stilling basin (DRH) on the Presidente Dutra Highway (RJ), utilizing rainfall data from ANA (1967–2025), rainfall disaggregation, and IDF curves recalibrated for a $TR=10$ years and $t_c=5$ min. The estimated flow rates were $Q=0.768 \text{ m}^3/\text{s}$ (DAD) and $Q=2.836 \text{ m}^3/\text{s}$ (DRH). It was found that the DAD dissipated 85.5% of the energy, but was hydraulically unstable ($B/Y_c=2.55 < 5$) and exhibited dissipation peaks of 11.530 W/m^3 , posing a risk of cavitation. In the DRH, it was estimated that the hydraulic jump requires a downstream depth (y_3) of 3.65 m, exceeding the designed basin height (h_{basin}) of 1.5 m. This generates an overflow of 2.15 m, resulting in a residual velocity of $\approx 12.5 \text{ m/s}$ and a high erosive potential. Thus, the study concludes that a retrofit is necessary (including weir widening, aeration, basin redesign with an end sill and USBR typology), and that the routine adoption of non-stationary IDF curves is required in road drainage maintenance programs.

Keywords: Climate Change, Energy Dissipation, Hydraulic Structures, Retrofit, Barra Mansa.

Análisis de Fallos de Seguridad y Funcionalidad en Dispositivos de Drenaje Vial/Carretero (DAD y DRH) en Respuesta a un Caudal Crítico

Resumen: Los sistemas de drenaje de carreteras diseñados con curvas IDF estacionarias pueden resultar insuficientes ante el reciente aumento de las lluvias intensas. Este trabajo evaluó el rendimiento de una escalera hidráulica (DAD) y un canal de bajada con cuenco amortiguador (DRH) en la Autopista Presidente Dutra (RJ), utilizando datos pluviométricos de ANA (1967–2025), desagregación de lluvia y curvas IDF recalibradas para un TR=10 años y $t_c=5$ min. Los caudales estimados fueron $Q=0,768\text{m}^3/\text{s}$ (DAD) y $Q=2,836\text{m}^3/\text{s}$ (DRH). Se constató que el DAD disipó el 85,5% de la energía, pero es hidráulicamente inestable ($B/Y_c=2,55 < 5$) y presentó picos de disipación de $11,530\text{ W/m}^3/\text{s}$, con riesgo de cavitación. En el DRH, se estimó que el resalto hidráulico requiere una profundidad aguas abajo (y_3) de $3,65\text{m}^3/\text{s}$, superando la altura del cuenco proyectada (h_{bacia}) de 1,5 m. Esto genera un desbordamiento (overflow) de 2,15 m, lo que implica una velocidad residual de $\approx 12,5\text{m/s}$ y un alto potencial erosivo. Por lo tanto, se concluye la necesidad de retrofit (ensanche del canal, aireación, redimensionamiento del cuenco con dique terminal (end sill) y tipología USBR), y la adopción rutinaria de curvas IDF no estacionarias en programas de mantenimiento de drenaje de carreteras.

Palabras clave: Cambio Climático, Disipación de Energía, Estructuras Hidráulicas, Retrofit, Barra Mansa.

INTRODUÇÃO

O relatório do IPCC (2024) apresenta as mudanças climáticas como um fenômeno natural que pode ocorrer na atmosfera, oceanos, criosfera e biosfera, de forma generalizada e rápida. Entretanto, com o processo de aceleração das atividades econômicas, e a geração de gases de efeito estufa, está ocorrendo uma aceleração em consequência dos impactos gerados.

Para Góis (2023), as mudanças climáticas tem importante impacto em várias áreas da engenharia. No campo da hidráulica, destacam-se os processos vinculados à precipitação máxima, sua intensidade de chuva e frequência. Isso porque uma das causas do processo de inundação ocorre quando, em um pequeno espaço de tempo, há uma intensidade de chuva muito alta, devido às alterações climáticas existentes. Com isso, os sistemas de drenagem não conseguem normalizar o fluxo do escoamento superficial. Como uma das soluções apresentadas, os sistemas de drenagem deveriam ser dimensionados consoante ao fator de precipitação.

Segundo Vinnarasi (2022), com o aumento vertiginoso das variações climáticas, os sistemas de drenagem devem ser revistos, principalmente no seu principal dado de entrada, a chuva. Para Tsuji (2023), como consequência, existe um agravamento de desastres associados à drenagem urbana, principalmente no que tange a países com climas tropicais, nos quais predomina o modelo higienista de saneamento e urbanização. Dessa forma, não é uma realidade o manejo do escoamento da chuva de forma sustentável e baseado na natureza.

Atualmente, nos principais manuais de drenagem urbana e de rodovias, as vazões estão atreladas às curvas de intensidade, duração e frequência (IDF), cuja a diretriz é a constância de eventos e menor variabilidade dos extremos. Com isso, presume-se que os sistemas calculados e construídos, em outrora, podem se tornar ineficientes, de acordo com esta nova realidade.

Para Moura (2014), o impacto das mudanças climáticas deve modificar a forma de obtenção dos sistemas de drenagem. Nos principais manuais de redes de sistemas de drenagem, o dimensionamento é calculado para receber vazões específicas, de acordo com seu Tempo de Retorno (TR) e intensidade de chuva. A ineficiência destes sistemas pode gerar impactos adversos, como o aumento velocidade da água em rios, córregos, inundações.

No Brasil, os projetos de drenagem rodoviária seguem padrões pré-estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Esta autarquia orienta a elaboração, projeto e execução das obras de drenagem por meio de documentos técnicos, como o Manual de Drenagem Rodoviária (2006) e outras apostilas técnicas específicas da área de Hidrologia e Drenagem. Rocha (2022) conceitua um projeto de drenagem de rodovia como um conjunto de dispositivos capazes de captar e conduzir a água de chuva de forma adequada, preservando a estrutura viária e seu entorno na incidência de precipitações intensas.

Para Canholi (2015), a escolha da alternativa técnica para um projeto hidráulico deve ser, necessariamente, avaliar quantitativamente e qualitativamente os aspectos econômicos, ambientais, políticos e operacionais. Além disso, esta solução deve ter a capacidade de se adaptar a uma necessidade de ampliação, seja pelo volume escoado ou mudança de alguma característica importante.

Nesse contexto, o presente estudo objetivou analisar e diagnosticar as falhas de segurança e funcionalidade dos dispositivos de drenagem rodoviária (DAD - Descida d'Água de Aterro em Degraus, e DRH - Descida Rápida com Ressalto Hidráulico) da Via Dutra, região de Barra Mansa (RJ), submetidos a uma vazão crítica simulada com base em curvas IDF não-estacionárias.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo de caso a ser realizado para análise de uma possível variação pluviométrica provocada pelas mudanças climáticas compreende área localizada no município de Barra Mansa – Rio de Janeiro, no Distrito de Floriano, como apresentado na Figura 1.

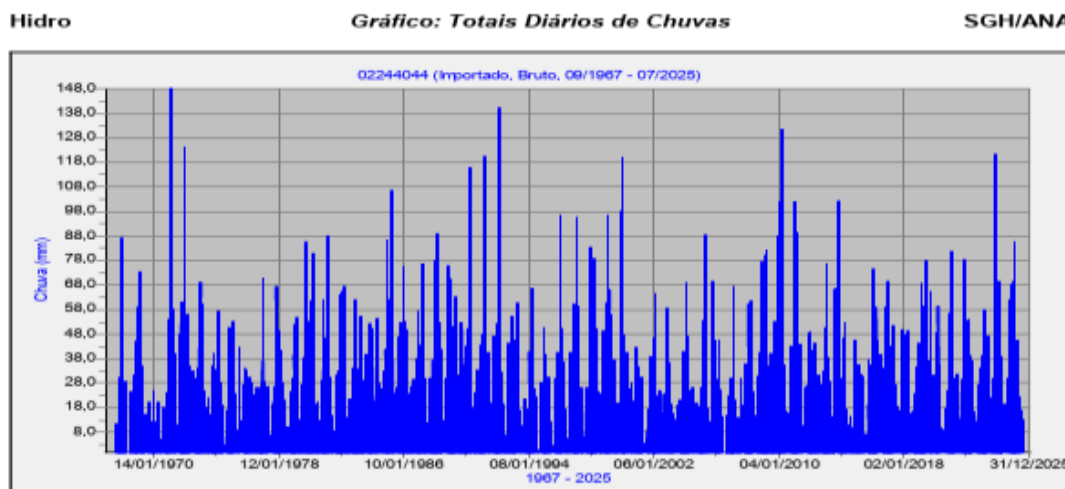


Figura 1. Localização da área de estudo.

Fonte: Adaptado de Google. Acesso, 2025.

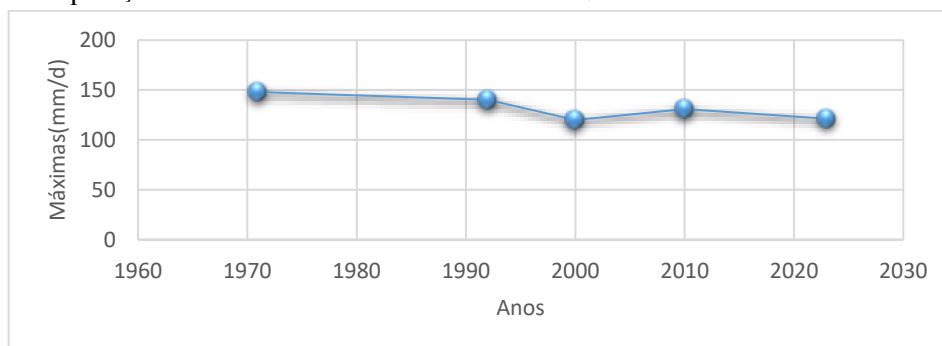
Para este estudo, foi utilizada a Estação Pluviométrica de Glicério, código 2244044, no município de Barra Mansa, com dados disponíveis no site da ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento (2025). A estação de Glicério é a mais próxima das áreas dos dispositivos de drenagem estudados (8km, aproximadamente), com série histórica disponível. Os dados pluviométricos são apresentados no Gráfico 1.

Os dados foram estudados utilizando o programa Hidro da ANA. Ressalta-se que o programa Hidro não realiza análises de consistência automática; ele apenas organiza, calcula estatísticas básicas e gera gráficos. Desse modo, a identificação de outliers e o preenchimento de falhas devem ser feitos manualmente. Após a revisão, os dados são atualizados na base oficial como séries consistidas. Embora os dados consistidos sejam em menor volume que os brutos, essa redução foi verificada por meio de uma análise comparativa.

Gráfico 1. Totais diários de Chuva da Estação de Glicério, Barra Mansa-RJ, entre 1967 e 2025.

Fonte: ANA (2025). Calculado por Hidro.2025.

As maiores pluviosidades dentro da série histórica analisada foram obtidas entre 1967 e 2025. O Gráfico 2 apresenta o volume das máximas diárias de chuvas na região de Barra Mansa-RJ.

Gráfico 2. Precipitação Máxima Diária entre 1967 a 2025, em Barra Mansa-RJ.

Fonte: ANA (2025).

Para análise comparativa entre as máximas precipitações e as curvas IDF se faz necessária a transformação da chuva máxima diária em mm/h, unidade da intensidade de chuva. Assim, foi utilizado o método de desagregação para equiparar as unidades, que consiste na multiplicação pelos coeficientes da (Tabela 1).

Tabela 1. Coeficientes de Desagregação da Chuva.

Coeficientes de desagregação de chuva de 24 horas das Relações de Durações	
30 min para 1 h	0,74
12 h para 24 h	0,85
24 h para 1 dia	1,14
1h para 5 min	0,25

Fonte: Adaptado pelos autores de CETESB (1986).

A fim de buscar melhor compreensão sobre a pluviosidade, estabelecer uma análise comparativa e determinar a intensidade mais adequada para projeto, foi utilizado também o Software Plúvio, versão 2.1, para o município de Barra Mansa-RJ. A Equação 1 estabelece a relação entre as variáveis da IDF, para determinação da intensidade máxima de projeto.

$$i = \frac{2564,630 \cdot T^{0,183}}{(t + 23,407)^{0,820}} \quad (1)$$

onde:

i = intensidade pluviométrica em mm/h;

TR = tempo de recorrência em anos;

t = tempo de duração da precipitação em minutos.

Neste estudo adotou-se um TR 10 anos e (tc) inicial de 5 minutos. Segundo Rocha, esse TR é um valor compatível com o tipo de estrutura e importância da rodovia. Já o tc é o menor tempo indicado no Manual de Drenagem do DNIT(2018), para bacias pequenas de contribuição.

De acordo com Tucci (2009), este método considera que o tempo de duração da precipitação é igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica, onde as perdas são representadas por um coeficiente de escoamento, determinado em função de características do uso do solo ao longo da área drenada, e não se avalia a distribuição temporal da vazão. Logo, a equação 2, referente ao método racional, foi considerada.

$$Q = 0,278 . C . I . A \quad (2)$$

onde:

Q = vazão de pico (m^3/s);

C = coeficiente de escoamento, 0,85

I = intensidade média máxima da chuva (mm/h) e

A = área da bacia hidrográfica (km^2).

Neste estudo, a vazão crítica foi definida como o maior volume ou descarga possível no sistema de drenagem, resultante da chuva de projeto associada às mudanças climáticas. uma efetiva avaliação da vazão crítica ao sistema, resume-se os cálculos realizados de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Síntese da Análise pluviométrica e determinação de Q Crítico.

Premissa	Valor	Tipo de Análise	Artigo - Observações
1. Máxima Observada (Dia de Maior Chuva)	6,64 mm/h	Dado Bruto / Observação	É a referência de campo da severidade da chuva na Estação de Glicério. É a maior precipitação de 24 horas registrada na série histórica. Este valor é o ponto de partida estatístico (já desagregado).
3. Chuva de Projeto Crítica (Plúvio/IDF)	251,31 mm/h	Não-Estacionária / Adaptativa	É a intensidade adotada para representar o impacto das mudanças climáticas e a realidade dos alagamentos. Este é o valor de entrada para o cálculo de Q crítico e para a sua simulação no SISCCOH.

Fonte: Elaboração própria.

Estruturas de dissipação de energia

Os dissipadores de energia têm como principal função a contenção da velocidade do escoamento para proteger as áreas a jusante que recebem o volume de chuvas (Ribeiro, 2025), sendo que a velocidade máxima nesses sistemas não deve exceder 5m/s , de acordo com o Manual de Instruções da Fundação Rio Águas (2025).

O presente trabalho foca em duas tipologias de dispositivos de drenagem rodoviária (DNIT, 2018): a Descida d'Água de Aterro em Degraus (DAD), ou escada hidráulica, que utiliza quedas sucessivas para dissipar energia em taludes de rodovias (França et. al., 2022)

A Descida Rápida com Ressalto Hidráulico (DRH) (Figura 2), são dispositivos com finalidade de escoar a água rapidamente do talude sua geometria e matérias são resistentes a velocidade do escoamento e a erosão.

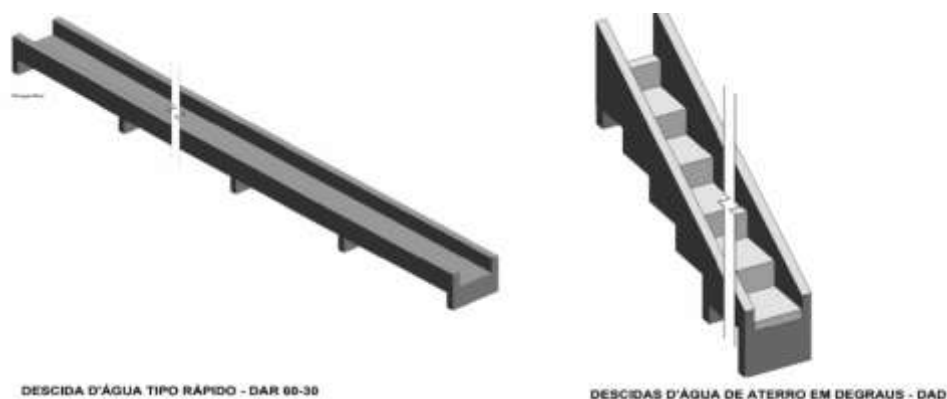


Figura 2. Dispositivos de drenagem - Descida de Água Rápida e Escadas Hidráulicas.
Fonte: Adaptado de DNIT(2023).

Em termos hidráulicos, o escoamento em dissipadores como as escadas hidráulicas e descidas rápidas podem ser classificados em duas classes: escoamento em quedas sucessivas (Nappe Flow) ou escoamento deslizante sobre turbilhões (Skimming Flow) (Brito et. al., 2023).

Os dissipadores são agrupados em contínuos (como as escadas hidráulicas) e localizados, sendo fundamental que a análise seja integrada quando dois dispositivos são utilizados em conjunto (Daniel et. al., 2022)

Para esta análise adotou-se a terminologia Descida Rápida com Ressalto Hidráulico o (DRH), para indicar a descida que por padrões construtivos, recebeu um degrau de 0,40m em seu canal, portanto diferenciando-se do padrão previsto no álbum de projetos do DNIT (2018).

Em termos hidráulicos, o escoamento em dissipadores como as escadas hidráulicas e descidas rápidas podem ser classificados em duas classes: escoamento em quedas sucessivas (Nappe Flow) ou escoamento deslizante sobre turbilhões (Skimming Flow) (Brito et. al., 2023).

Embora o Álbum de Projetos do DNIT (2018) forneça especificações técnicas de geometria para vazões recomendadas, é crucial que o dimensionamento seja calculado com base no volume estimado para casos específicos.

Os dissipadores são agrupados em contínuos (como as escadas hidráulicas) e localizados, sendo fundamental que a análise seja integrada quando dois dispositivos são utilizados em conjunto (Daniel et. al., 2022).

O presente trabalho concentra-se em dois dispositivos (DAD e DRH), ambos localizados na Rodovia Presidente Dutra, no município de Barra Mansa (RJ). Figuras 4 e 5). A visita técnica foi realizada em 15 de outubro de 2025, com o objetivo de caracterizar a estrutura hidráulica.

A DAD drena uma área de contribuição de 0,0013 Km², enquanto que o DRH, uma área de 0,0048 Km² (Figura 3).



Figura 3. Áreas de contribuição.

Fonte: Adaptado de Google Earth, 2025.

A estrutura DAD existente apresenta degraus não homogêneos, com o primeiro espelho medindo 0,20m e os cinco degraus subsequentes medindo 0,60m cada (Tabela 3). Considerando que o software SisCCoH, baseado nas teorias de Chanson e Ohtsu, exige canais com a mesma dimensão para classificar o escoamento, a análise da DAD foi necessariamente dividida em duas sub-partes: (i) Análise da primeira seção (1 degrau, Espelho 1), (ii) Análise da segunda seção (5 degraus restantes, Espelhos 2 a 6). Como pode ser visto na Figura 4.

A divisão a ser realizada permite uma maior compreensão do comportamento hidráulico do dispositivo, assim mensurando de forma mais adequada os impactos do escoamento em relação à drenagem.



Figura 4. Descida d'Água de Aterro (DAD).
Fonte: Elaboração própria.

Após realização de visita técnica em campo, a Tabela 3 apresenta os dados técnicos desta estrutura hidráulica.

Tabela 3. Dados coletados da DAD (Descida d'Água de Aterro em Degraus) - Em campo.

Característica	Cota (Dimensão)	Funções e Implicações na Análise
Altura Total do Talude	8,00 m	0 desnível máximo que a água deve percorrer (Geometria Rodoviária)
Altura da Escada (Seção com Degraus)	5,00 m	A porção onde a energia é dissipada
Largura da entrada no sistema	0,9m	-
Espelho 1	0,20 m	Primeiro degrau.
Espelhos 2 a 6 (5 Degraus)	0,60 m	Degraus restantes.
Número Total de Degraus	6	A ser usado na simulação
Piso (Largura do Degrau)	1,0 m	Usado na razão geométrica (Piso/Espelho).

Fonte: Elaboração própria.

O segundo dispositivo analisado aproxima-se de um Descida d'Água tipo Rápido (DAR); como possui uma queda de 0,4 m em sua calha, não se caracteriza propriamente, o que está disposto no álbum de projetos do DNIT (2018), utilizou-se outra nomenclatura nesta pesquisa, “Descida Rápida com bacia de Dissipação por ressalto Hidráulico (DRH)” (Figura 5).

O DRH ainda possui uma bacia dissipadora “no pé” do dispositivo de descidas, sendo responsável pela dissipação de energia do escoamento. A bacia é ligada diretamente a drenagem pluvial da cidade.



Figura 5. Descida d'Água de Aterro (DRH).

Fonte: Elaboração própria.

Com base na visita técnica em campo, a Tabela 4 apresenta as informações técnicas da estrutura hidráulica analisada.

Tabela 4. DRH – Características levantadas em campo.

Característica	Valor	Unidade	Detalhamento
Altura Total do Talude (H total)	8	(m)	Queda total de nível a ser vencida.
Comprimento Total da Rampa (L total)	15	(m)	Comprimento da calha ao longo do talude (8,50 m+6,50 m).
Largura Constante da Calha	0,5	(m)	Largura uniforme em toda a extensão.
Ressalto (Salto Vertical)	0,4	(m)	Perda de altura concentrada (dissipação de energia).
Queda na Inclinação (H inclinação)	7,6	(m)	Altura utilizada no cálculo da declividade (8,00 m–0,40 m).
Declividade da Rampa (i)	0,5067	(m/m)	Razão entre a queda na inclinação e o comprimento total (7,60/15,00).
Declividade Percentual	50,67%	(%)	Inclinação final da calha.
Dimensões da Bacia	1,5×1,5×1,5	m	-

Fonte: Elaboração própria.

Contudo os padrões pré-estabelecido pelo DNIT (2018), os dissipadores de energia deveriam seguir as especificações de seu manual, respectivamente, Dispositivo de Descida de Água em Aterros em Degraus (DAD) e o Dispositivo Descida Rápida de Água em Aterro (DAR) (Tabela 5).

Tabela 5. Dados Técnicos.

Descida d'água	a x b (cm)	Capacidade -(m³/s)	Dissipador Associado
DAD 60-36	60x36	0,536l	DEB-1 (Bacia de dissipação tipo l)
DAD 110-26	110x26	0,4343	DEB-1
DAD 125-30	125x30	0,88	DEB-2
DAD 170-35	170x30	1,53	DEB-3
DAD 200-40	200x40	2,42	DEB-3
DAD 240-54	240x54	4,22	DEB-4
DAD 320-35	320x35	3,07	DEB-4
DAD 370-45	370x45	4,84	DEB-5
DAD 435-55	435x55	8,45	DEA-1 (Poço de amortecimento)
DAD 470-35	470x35	4,7	DEB-5
DAD 608-50	608x50	4,43	DEO (Enrocamento)
DAR 6030	60x30	0,2784	DEO
DAR 40-20	40x20	0,064	DEO

Fonte: Adaptado DNIT(2018).

A avaliação da Descida d'Água de Aterro em Degraus (DAD) e da Descida Rápida com Ressalto Hidráulico (DRH) baseou-se na vazão crítica simulada por uma curva de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) não-estacionária, reflexo das mudanças climáticas.

Para a DAD, a análise seguiu critérios objetivos de Simões (2008), focando em: tipo de escoamento (determinado pelo Número de Froude), dissipação de energia, energia residual e, principalmente, riscos de cavitação e instabilidade. Foi utilizado o *software* SisCCoH (Alexandre et. al., 2019) para classificar o regime de escoamento (ex: *Nappe Flow* ou *Skimming Flow*) e analisar a eficiência do sistema. No entanto, o SisCCoH é limitado a canais de dimensões homogêneas.

Como o DRH apresenta degraus de dimensões diferentes (o primeiro degrau é distinto), foi necessária a aplicação manual de equações hidráulicas (Equações 3 a 11), baseadas nas teorias de Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2004) e Hubert Chanson (1990), e contidas no Manual do DNIT (2008), para alcançar a eficiência global e diagnosticar as falhas de segurança.

A eficiência da dissipação de energia (η) é calculada pela Equação 3:

$$\eta_{total} = \frac{E_{máxima} - E_{residual\ final}}{E_{máximo}} * 100\% \quad (3)$$

onde:

η = eficiência (Adimensional ou %);

E máxima : é a Energia Máxima da primeira seção (1 degrau), pois ela representa a energia total disponível no início do sistema (m);

E residual final: é a Energia Residual da segunda seção (5 degraus), pois ela representa a energia remanescente no final de todo o sistema de escada (m).

O cálculo do Número de Froude Final é obtido pela equação 4.

$$Fr = \frac{V_f}{\sqrt{g \cdot y_f}} \quad (4)$$

onde:

Vf= Velocidade Final (Adimensional);

Yf= Profundidade Final (m/s);

g = 9,8m/s² (Aceleração da Gravidade).

O cálculo da profundidade crítica é obtido pela equação 5.

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot B^2}} \quad (5)$$

onde: Yc = Profundidade Crítica (m);

Q = Vazão (m³/s); B= Largura da Escada (m);

g = 9,8m/s² (Aceleração da Gravidade).

O cálculo da velocidade média é realizado pela equação 6.

$$V = \frac{Q}{B \cdot Y_c} \quad (6)$$

onde: Q = Vazão (m³/s); Y=Profundidade de Escoamento – crítica (m); B= Largura da Escada(m).

O cálculo da Dissipação máxima encontrada é realizado pela equação 7.

$$\epsilon = \frac{\gamma \cdot Q \cdot \Delta h}{B \cdot L \cdot Y} \quad (7)$$

onde:

€ = Dissipação Máxima (W/m³ ou J/(s·m³);

γ = Peso Específico da Água em N/m³;

Q = Vazão (m^3/s);

Δh = Altura da Queda (Espelho) (m);

B = Largura da Escada (m);

L = Piso (Comprimento do Degrau) dissipação (m);

Y = Profundidade de Escoamento (m).

O cálculo da velocidade de entrada (Conservação de Energia/Torricelli) é obtido pela equação 8.

$$V_{\text{entrada}} = \sqrt{2 * g * h_{\text{rampa}}} \quad (8)$$

onde:

V_{entrada} : Velocidade de entrada (m/s);

g = Gravidade ($9,8\text{m/s}^2$);

h = É a altura vertical efetiva que a água perde *ao longo da inclinação* da calha (m).

O cálculo de Perda de Carga no Ressalto (Dissipação) é dado pela equação 9.

$$HL = \frac{(y^3 - y^2)^3}{4 * y^2 * y^3} \quad (9)$$

onde:

HL = Perda de Carga no Ressalto (Dissipação) (m);

y^3 = Profundidade a jusante (m);

y^2 = Profundidade a montante (m);

Para calcular a profundidade de água no dispositivo, é necessário forçar o ressalto hidráulico à jusante, com a profundidade de entrada conforme apresentado na Equação 10.

$$\frac{y^2}{y^3} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8Fr^2} - 1 \quad (10)$$

onde:

y^2 = Profundidade a montante (m);

y^3 = Profundidade a jusante (m);

Fr= Número de Froude (Adimensional).

Na análise da falha estrutural do dispositivo DRH, deve-se avaliar a Profundidade Conjugada Requerida, calculada pela Equação (9), com a Altura da Bacia Projetada, de acordo com a Equação 11.

$$\text{Overflow} = y_3 - h_{\text{bacia}} \quad (11)$$

onde:

Overflow = Extravasamento (m);

y_3 =Profundidade a jusante (m);

(Equação 10) (m);

Hbacia = Altura da Bacia Projetada (m).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise hidráulica foi conduzida sob dois cenários distintos de intensidade de chuva para determinar a vazão de projeto (Q): (i) a Máxima Intensidade Observada (referência de campo), obtida através da desagregação do maior evento diário da série histórica (1967–2025), resultando em 6,64mm/h e ; (ii) a Chuva de Projeto Crítica, determinada a partir da Equação IDF recalibrada (Equação 1) para um TR 10 anos e tc de 5 minutos resultando em 251,31 mm/h. Este último valor representa o maior valor em um cenário de chuva simulada, e foi adotado para cálculo da vazão crítica para definição do retrofit necessário para atendimento desse evento e proporcionar a devida segurança ao sistema, (Tabela 6).

Utilizando-se a intensidade crítica (definida pela Equação 1) e as áreas de contribuição e as áreas de contribuição dos dispositivos DAD (0,0013km²) e DRH (0,0048 km²), (delimitadas na Figura 3), foi calculada vazão por meio do Método Racional (Equação 2). Os valores resultantes estão sintetizados na Tabela 6.

Tabela 6. Cálculo de vazão pelas áreas de contribuição

Dispositivo	Cenário	Intensidade (mm/h)	Área (km ²)	C	Vazão Q (m ³ /s)
DAD	Série Histórica	6,64	0,0013	0,85	0,00002
DHR	Série Histórica	6,64	0,0048	0,85	0,00008
DAD	IDF	251,31	0,0013	0,85	0,768
DHR	IDF	251,31	0,0048	0,85	2,836

Fonte: Elaboração própria.

Para análise do primeiro dispositivo (DAD), utilizou-se o software SisCCoH com a vazão de $0,768 \text{ m}^3/\text{s}$ para determinar chuva extrema nas duas partes do dispositivo. A primeira parte, que possui um degrau de 20cm, foi classificada como Skimming Flow. Nota-se, na Figura 6, uma linha da cor azul como limite deste escoamento e um círculo determinando a faixa de criticidade.

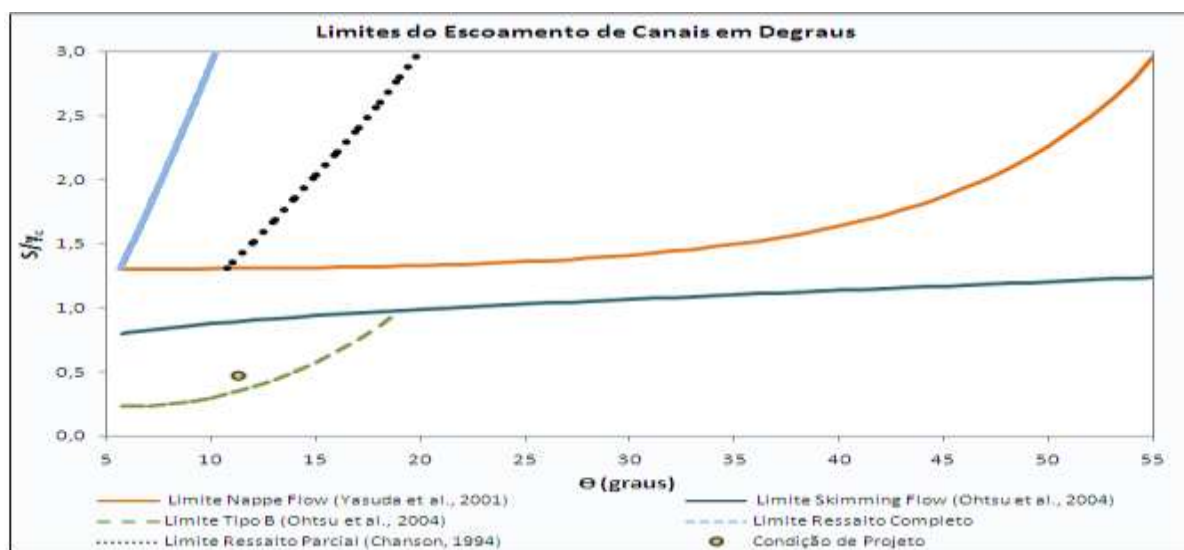


Figura 6. Classificação do dispositivo DAD - 1-Primeiro Degrau

Fonte: Elaboração própria.

No software SisCCoH, após a classificação, a próxima etapa é a análise hidráulica, que fornecerá resultados para avaliação dispositivo. Para isso, utilizou-se a vazão prevista na Tabela 6 ($0,768 \text{ m}^3/\text{s}$) e os dados coletados do dispositivo na visita técnica (Tabela 3).

O SisCCoH calculou os resultados para análise do dispositivo, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7. Resultados da Simulação – 2 Degraus

Vazão ($\text{m}^3/\text{s.m}$)	0,853
Velocidade Final do Escoamento (m/s)	2,913
Energia Residual (m)	0,725
Velocidade Crítica de Cavitação no Início da Aeração - V_{cra} (m/s)	17,771
Profundidade Aerada do Escoamento (m)	0,41

Fonte: Elaboração própria.

O resultado desta primeira análise, de parte do dispositivo DAD, é que, hidraulicamente, no primeiro degrau da escada, ocorre a dissipação da velocidade (2,913m/s) inferior a 5m/s, ou seja, dentro dos limites definidos para redes de drenagem. Além disso, a energia residual pode ser considerada baixa, pois a recepção do escoamento é o concreto, que possui resistência mínima 20fck. Já a velocidade crítica sendo maior que a velocidade final do escoamento, pode levar ao processo de cavitação. Este consiste na formação de bolhas de vapor que se chocam com o concreto, trazendo danos à estrutura.

Diferentemente da primeira avaliação, a classificação do escoamento realizada pelo SisCCoH para os outros 5 degraus do DAD, foi a Nappe Flow, como apresentado na Figura 7. O escoamento está nas proximidades da linha de cor laranja, que representa o limite para este tipo de escoamento.

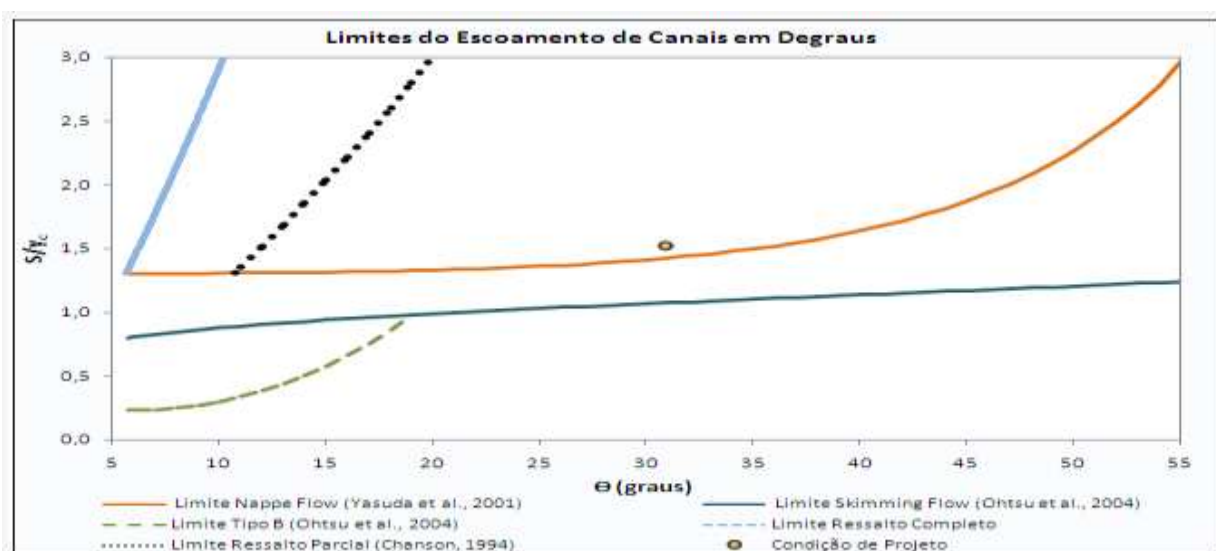


Figura 7. Classificação do dispositivo DAD com os outros 5 Degraus

Fonte: Elaboração própria.

A segunda parte da escada DAD (com 5 degraus) foi avaliada da mesma forma que a sua antecessora. A avaliação hidráulica do dispositivo é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados da Avaliação da DAD, segunda parte.

Parâmetro	Unidade	Valor Calculado
Profundidade Crítica (Y_c)	m	0,392
Relação de Instabilidade (B/Y_c)	-	2,55
Número de Froude (Fr)	-	$\approx 1,00$
Eficiência Total de Dissipação (η_{total})	%	0,855
Dissipação Máxima ($\epsilon 0,60$ m)	W/m^3	11,530
Velocidade na Saída ($V_{saída}$)	m/s	1,96
Energia Residual Final ($E_{residual\ final}$)	m	0,725

Fonte: Elaboração própria.

Analisando DAD-2 (degraus de 0,60m), verifica-se uma estabilidade hidráulica provocada pela (B/Y_c) > 5 , parâmetros do software. Isso ocorre pela relação, ou seja, geometricamente o dispositivo está adequado ao escoamento, com atrito desprezível, nas suas laterais.

Já no critério de dissipação máxima ($11,530 W/m^3$), constata-se que o valor é muito alto, pois o limite de segurança hidráulica é de $2,00 W/m^3$, previsto por Chanchon(1990), indicando uma turbulência localizada e intensa. Como na outra parte desta escada, existe risco de cavitação.

O número de Froude igual a 1 é uma condição de estabilidade neutra, portanto, não influencia negativamente o funcionamento do dispositivo.

Esta parte da escada, em termos de dissipação, comporta-se com eficiência alta, de 0,855, ou seja, 85,5%. Como a velocidade de saída do escoamento é de 1,96m/s, menor que 5m/s, em termos de funcionalidade, a escada possui uma dissipação aceitável.

Para análise do dispositivo DRH, tentou-se realizar a classificação e simulação pelo software SisCCoH, mas por sua geometria diferenciada, não foi possível. Então, a avaliação foi realizada por meio de equações hidráulicas, presentes no seu manual e na literatura (equações de 1 a 10).

Como resultado destes cálculos realizados manualmente, gerou-se Tabela 9, que possibilitou a avaliação do funcionamento do dispositivo DRH.

Tabela 9. Resultados da Avaliação da escada

Parâmetro	Símbolo	Valor Calculado
Vazão de Projeto Crítica	Q	2,836 m ³ /s
Velocidade na Entrada da Bacia	V2	12,53 m/s
Número de Froude	Fr2	5,94
Profundidade Conjugada Requerida	y3	3,65 m
Altura da Bacia Projetada	h_bacia	1,5 m
Extravasamento (Overflow)	–	2,15 m
Energia Dissipada Potencial	HL	5,23 m

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 9 indica velocidade de entrada de 12,53 m/s e Número de Froude (Fr_2) de 5,94, classificando o escoamento como supercrítico, com alta energia e dominado pela inércia. Apesar da queda inicial de 0,4 m, a perda de carga (HL) foi de 5,23 m ($\approx 65,4\%$ da carga disponível), demonstrando que a geometria da bacia não promove dissipação efetiva.

A profundidade conjugada requerida ($y_3 = 3,65$ m) supera em 2,15 m a altura da bacia (1,50 m), configurando falha crítica por extravasamento e impedindo a formação do ressalto hidráulico. Como resultado, o fluxo mantém velocidades residuais elevadas, com risco de erosão e socavação a jusante.

CONCLUSÃO

Estudo avaliou a eficiência de dois dispositivos de drenagem – DAD e DRH – sob vazões críticas de 0,768 m³/s e 2,836 m³/s, simulando eventos extremos de pluviosidade associados às mudanças climáticas.

A DAD apresentou eficiência de dissipação de 85,5% sobre a queda de 5 m, mas a relação $B/Y_c = 2,55$ e o pico de 11.530 W/m³ indicam instabilidade lateral, risco de cavitação e desgaste precoce do material.

Na DRH, o escoamento supercrítico ($Fr = 5,94$; $V = 12,53$ m/s) requer profundidade conjugada de 3,65 m, enquanto a bacia possui apenas 1,5 m, gerando overflow de 2,15 m e ineficiência na dissipação de energia, com risco de erosão e socavação a jusante.

Com base nessas simulações recomenda-se o retrofit das estruturas, com aumento da altura da bacia ou inclusão de blocos dissipadores (baffles) na DRH e reforço do revestimento e geometria otimizada na DAD.

Além disso, é recomendável que futuras análises devem considerar a integração da modelagem climática e hidráulica integrada, conforme Moura (2014) e Vinnarasi (2022), para

Análise de Falhas de Segurança e Funcionalidade em Dispositivos de Drenagem Rodoviária (DAD e DRH) em Resposta à uma Vazão Crítica

adequar os dispositivos de drenagem às novas condições pluviométricas e hidrológicas associadas às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Série histórica de precipitação (1967-2025) – base de dados pluviométricos obtida via WebService*. Brasília, DF: ANA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ana.gov.br>. Acesso em: 10 out. 2025.

ALEXANDRE, C. A.; SILVA, R. M.; MENDES, P. J. *Manual do software SisCColl: Sistema de Cálculo de Componentes Hidráulicos*. Brasília, DF: DNIT, 2019.

BRITO, M. A.; FREITAS, R. M.; LOPES, D. C. *Análise hidráulica de escadas dissipadoras em taludes de rodovias*. Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 28, n. 3, p. 455–468, 2023.

CANHOLI, Aluísio Pardo. *Drenagem urbana e controles de enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CHANCHON, Hubert. *Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1990.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Drenagem urbana – Manual de projeto*. São Paulo: CETESB, 1986.

DANIEL, A. C.; BARBOSA, T. L.; MOURA, R. M. *Estudo de eficiência de dissipadores de energia em escadas hidráulicas*. Revista Engenharia Civil, v. 72, p. 112–128, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Manual de Drenagem Rodoviária*. Brasília, DF: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Álbum de Projetos – Dispositivos de Drenagem Rodoviária*. Brasília, DF: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Publicação IPR – 736: ÁLBUM DE PROJETOS-TIPO DE DISPOSITIVOS DE DRENAGEM (Atualização do Capítulo 1 – Drenagem Superficial)*. Brasília, DF: DNIT, 2023.

FRANÇA, L. P.; OLIVEIRA, F. C.; MACHADO, T. L. *Dissipadores de energia em sistemas de drenagem urbana: estudo de eficiência e dimensionamento*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 27, n. 4, p. 785–798, 2022.

GÓIS, Ricardo A. *Impactos hidrológicos das mudanças climáticas na engenharia hidráulica*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 28, p. 1–14, 2023.

GOOGLE EARTH. *Imagem / mapa adaptado de Google Earth*. 2025. Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em: 10 out. 2025.

HIDRO SOFTWARE. *Hidro Software* [software de análise hidrológica]. Versão 5.0. São Paulo: Hidro Engenharia, [s.d.]. Disponível em: <https://www.hidrosoftware.com.br>. Acesso em: 10 out. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Special Report on Climate Change and Cities*. Genebra: IPCC, 2024. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/special-report-on-climate-change-and-cities/>. Acesso em: 10 out. 2025.

MOURA, Carolina Natel de. *Impactos hidrológicos de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do Alto Canoas, SC*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –Lages, 2017

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. *Flow characteristics of skimming flows on stepped spillways*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 130, n. 9, p. 860–869, 2004.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. *Manual de drenagem urbana do município do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Fundação Geo-Rio, 2025.

RIBEIRO, Jonathan Marino Resende; GIOVANARDI, Marco Alves. *Dissipador de energia para drenagem de águas pluviais através de escada hidráulica*. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 33., 2025, Curitiba. Rio de Janeiro: ABES, 2025. Acesso em: 10 out. 2025.

ROCHA, L. F. *Drenagem rodoviária: conceitos e dimensionamento de dispositivos*. Revista Engenharia Civil, v. 29, n. 2, p. 212-225, 2022.

SIMÕES, A. J. *Dimensionamento hidráulico de escadas dissipadoras de energia*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRGS. Porto Alegre, 2008.

TSUJI, J. Y. *Urbanização e drenagem pluvial em países tropicais: desafios e soluções sustentáveis*. Revista Brasileira de Engenharia Urbana, v. 18, n. 1, p. 45-59, 2023.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

VINNARASI, R. *Assessment of Climate Variability Impact on Urban Drainage Systems*. Journal of Hydrology and Climate Change, v. 5, n. 2, p. 119-130, 2022.