UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

LUIZ HENRIQUE NUNES NOVAES

PROJETO DE DRENAGEM SUPERFICIAL

Estudo de Caso: Rodovia Classe III na Cidade de Tucuruí - PA

BELÉM – PA

2022

LUIZ HENRIQUE NUNES NOVAES

PROJETO DE DRENAGEM SUPERFICIAL

Estudo de Caso: Rodovia Classe III na Cidade de Tucuruí - PA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar

BELÉM – PA

2022

LUIZ HENRIQUE NUNES NOVAES

PROJETO DE DRENAGEM SUPERFICIAL

Estudo de Caso: Rodovia Classe III na Cidade de Tucuruí - PA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Belém, 08 de dezembro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
MARCELO FIGUEIREDO MASSULO AGUIAR
Data: 08/12/2022 10:59:45-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar
Orientador - UFPA

Documento assinado digitalmente
MARCUS VINICIUS GUERRA SERAPHICO DE
Data: 12/12/2022 04:41:33-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis Carvalho
Examinador Interno - UFPA

Documento assinado digitalmente
CHAIRA LACERDA NEPOMUCENO
Data: 08/12/2022 11:57:46-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Engª. M. Sc. Chaira Lacerda Nepomuceno
Examinadora Externa – DNIT/PA

Aprovado, com conceito EXC ,em
08 de dezembro de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai que, infelizmente, faleceu ainda muito jovem e não pôde estar presente nesse momento da minha vida.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me concedido saúde, disposição e sabedoria para conduzir não somente a escrita deste trabalho, como também todos esses anos dedicados ao curso.

Agradeço imensamente aos meus pais por todos os sacrifícios feitos para que eu tivesse a oportunidade de estudar e realizar meus objetivos profissionais, além de todo os conselhos a mim fornecidos, aos auxílios prestados, ao apoio e respeito dado às minhas escolhas ao longo da vida e, sobretudo, ao amor e carinho compartilhados em nosso dia a dia.

Ao meu irmão pela amizade desenvolvida desde nossa infância, que se manteve forte e próxima mesmo em momentos em que estivemos distantes. Agradeço aos conselhos que me foram dados e às conversas que tivemos, fundamentais para meu crescimento pessoal.

Ao meu tio que me aconselhou a seguir essa área e que é um grande entusiasta das minhas conquistas desde então, além de ser o grande responsável pela primeira oportunidade profissional que tive.

Aos meus familiares por entenderem os momentos de ausência e apoiarem meus projetos e minhas escolhas.

Aos incríveis amigos de faculdade que tive a oportunidade de conhecer, agradeço por toda a força prestada, pela amizade desenvolvida, pela ajuda em tantos momentos difíceis ao longo da graduação e, sobretudo, pelos inúmeros momentos felizes que compartilhamos juntos.

Aos engenheiros Herick e Marcelo pelos ensinamentos e pela paciência ao passá-los, pelas experiências compartilhadas nos últimos meses e, especialmente, pelo respeito e amizade desenvolvidos ao longo do meu período de estágio, fundamentais para a criação de um ambiente mais leve, acolhedor e de liberdade para o aprendizado.

E, por fim, ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Massulo pelos ensinamentos, contribuições, serenidade e amizade, essenciais para que este trabalho pudesse ser concretizado.

RESUMO

A drenagem é um item essencial na infraestrutura das rodovias, pois além de ampliar a sua vida útil, promove a proteção das obras de contenção, diminuição da deterioração no entorno e reduz despesas com a conservação de vias. Logo, um sistema de drenagem eficaz auxilia na remoção segura da água e evita o seu acúmulo tanto na plataforma da via quanto no seu entorno. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é efetuar o projeto de drenagem superficial mais econômico para um trecho de rodovia a ser construído em Tucuruí – PA. Para isso, foi realizado o dimensionamento da drenagem de 1ª linha (sarjetas e valetas) através da comparação entre o comprimento crítico calculado e a extensão real do trecho - com posterior escolha dos elementos mais econômicos que pudessem atender tecnicamente ao projeto –, seguido do dimensionamento da drenagem de 2ª linha (descidas d'água e bueiros) por meio da determinação das dimensões de cada elemento, considerando as vazões reais calculadas para as sarjetas. Os principais resultados encontrados foram: A seção-tipo adotada para as sarjetas foi a STC-03, com comprimento crítico mínimo de 545,17m (trecho curvo em corte) e máximo de 1236,12m (trecho reto em aterro); A seção-tipo adotada para as valetas de proteção de corte foi a VPC-04, com maior vazão solicitante de 0,39m³/s ocorrendo na valeta V19; A seção-tipo adotada para as valetas de proteção de aterro foi a VPA-04, com maior vazão solicitante de 0,23m³/s ocorrendo na valeta V18; A descida d'água escolhida foi do tipo DCD-04, com largura de 0,80m e altura de 1,00m; Os bueiros de greide adotados foram do tipo BSCC, com base e altura de 1,50m. Por fim, pôde-se concluir que o projeto teve êxito do ponto de vista técnico e econômico, já que foi possível apontar soluções que melhor atendiam às solicitações de projeto e, simultaneamente, reduziam custos com materiais.

Palavras-chave: Drenagem de Rodovias; Escoamento Superficial das Águas; Drenagem de 1ª Linha; Drenagem de 2ª Linha.

ABSTRACT

Drainage is an essential item in the infrastructure of highways, as in addition to extending its useful life, it promotes the protection of containment works, reduces deterioration in the surroundings and reduces expenses with road conservation. Therefore, an effective drainage system assists in the safe removal of water and prevents its accumulation both on the track platform and its surroundings. Therefore, the objective of this work is to carry out the most economical surface drainage project for a stretch of highway to be built in Tucuruí - PA. For this, the dimensioning of the 1st line drainage (gutters and ditches) was carried out through the comparison between the calculated critical length and the actual extension of the section - with subsequent choice of the most economical elements that could technically meet the project -, followed by the dimensioning of the 2nd line drainage (waterfalls and culverts) by determining the dimensions of each element, considering the actual flows calculated for the gutters. The main results found were: The standard section adopted for the gutters was STC-03, with a minimum critical length of 545.17m (curved section in cut) and a maximum of 1236.12m (straight section in embankment); The standard section adopted for the cutting protection ditches was the VPC-04, with the highest flow rate of 0.39m³/s occurring in the V19 ditch; The standard section adopted for the landfill protection ditches was VPA-04, with the highest flow rate of 0.23m³/s occurring in ditch V18; The water descent chosen was the DCD-04 type, with a width of 0.80 m and a height of 1.00 m; The graded culverts adopted were of the BSCC type, with a base and height of 1.50 m. Finally, it could be concluded that the project was successful from a technical and economic point of view, since it was possible to point out solutions that best met the project requests and, simultaneously, reduced material costs.

Keywords: Highway Drainage; Superficial Water Runoff; 1st Line Drainage; 2nd Line Drainage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Traçado da Rodovia 27
Figura 2 - Fluxograma do Método Utilzado no Trabalho 29
Figura 3 - Trechos Adotados para a Rodovia 46
Figura 4 - Posição dos Bueiros B1 e B2 47
Figura 5 - Posição do Bueiro B3 48
Figura 6 - Valetas Adotadas ao Longo da Borda Direita da Rodovia 49
Figura 7 - Posição Adotada para as DCD 1, 2, 3 e 4 56
Figura 8 - Posição Adotada para as DCD 5, 6 e 7 e DAD 3 e 4. 56
Figura 9 - Posição Adotada para as DAD 1 e 2 57
Figura 10 - Posição Adotada para os Bueiros B4 e B5 59
Figura 11 - Posição Adotada para o Bueiro B6 59
Figura 12 - Área de Encontro das Águas no Terreno 60
Figura 13 – Drenagem da Rodovia (Estacas 0 a 20) 65
Figura 14 - Drenagem da Rodovia (Estacas 21 a 40) 65
Figura 15 - Drenagem da Rodovia (Estacas 41 a 60) 66
Figura 16 - Drenagem da Rodovia (Estacas 61 a 80) 66
Figura 17 - Drenagem da Rodovia (Estacas 81 a 91) 66
Figura 18 - Identificação dos Trechos 1 e 2 (borda direita) e 1 a 4 (borda esquerda) 80
Figura 19 - Identificação dos Trechos 3, 4 e 5 (borda direita) e 5, 6 e 7 (borda esquerda) 80
Figura 20 - Identificação dos Trechos 6 (borda direita) e 8 (borda esquerda) 80
Figura 21 - Identificação dos Trechos 7 e 8 (borda direita) e 9 e 10 (borda esquerda) 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de Escoamento Superficial / Run-Off 6
Tabela 2 -Tempos de Recorrência Recomendados pelo DNIT.....9
Tabela 3 - Tempos de Concentração Recomendados pelo DNIT.....9
Tabela 4 - Coeficientes de Rugosidade de Manning Recomendados pelo DNIT 12
Tabela 5 - Resumo dos Elementos de Drenagem 15
Tabela 6 - Informações Básicas da Rodovia.....28
Tabela 7 - Largura dos Taludes de Contribuição 34
Tabela 8 - Am, Pm e Rh das Sarjetas.....35
Tabela 9 - Coeficientes Característicos Para Cada Superfície 36
Tabela 10 - Comprimento Crítico das Sarjetas de Aterro Para Trecho Reto 37
Tabela 11 - Comprimento Crítico das Sarjetas de Aterro Para Trecho em Curva 38
Tabela 12 - Comprimento Crítico das Sarjetas de Corte Para Trecho Reto 38
Tabela 13 - Comprimento Crítico das Sarjetas de Corte Para Trecho em Curva 39
Tabela 14 - Extensão Real de Cada Trecho da Rodovia.....40
Tabela 15 - Velocidade Máxima Admissível em Cada Tipo de Material 41
Tabela 16 - Velocidade de Escoamento das Sarjetas 42
Tabela 17 - Resumo das Sarjetas que Atendem ao Projeto 43
Tabela 18 - Comprimentos Criticos da STC-03 44
Tabela 19 - Vazão Real Para as Sarjetas da Borda Direita 46
Tabela 20 - Vazão Real Para as Sarjetas da Borda Esquerda 47
Tabela 21 - Am, Pm e Rh das Valetas.....49
Tabela 22 - Cálculo da Vazão Solicitante na Valeta 51
Tabela 23 - Vazão Suportada por Cada Valeta 52
Tabela 24 - Valetas com Velocidade Incompatível 53
Tabela 25 - Cálculo da Altura de Lâmina D'Água 54
Tabela 26 - Vazão Real Suportada em Cada Dispositivo 55
Tabela 27 - Elementos de Contribuição para as Descidas D'Água.....58
Tabela 28 - Vazão de Contribuição para Cada Bueiro.....60
Tabela 29 - Relações para Condutos Circulares Parcialmente Cheios 62
Tabela 30 - Consumo de Material para Bueiros Celulares 64
Tabela 31 - Consumo de Material para Bueiros Tubulares.....64
Tabela 32 - Altura da Lâmina D'Água pelo Método das Tentativas 86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação Entre Declividade e Comprimento Crítico para Trechos em Aterro 44
Gráfico 2 - Relação Entre Declividade e Comprimento Crítico para Trechos em Corte 45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Considerações Iniciais 1

1.2. Objetivos 2

1.2.1. Geral 2

1.2.2. Específicos 2

1.3. Justificativa 3

1.4. Estrutura do Trabalho 4

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

2.1. Pré-requisitos para o dimensionamento de drenagem de rodovias 5

2.1.1. Hidrologia 5

2.1.1.1. Coeficiente de Escoamento Superficial 6

2.1.1.2. Chuva de Projeto 7

2.1.1.2.1. Tempo de Recorrência (TR) 8

2.1.1.2.2. Tempo de Concentração (tc) 9

2.1.1.3. Área de Bacia 10

2.1.2. Hidráulica 10

2.1.2.1. Área Molhada 11

2.1.2.2. Raio Hidráulico 11

2.1.2.3. Declividade do Canal 12

2.1.2.4. Coeficiente de Rugosidade de Manning 12

2.1.3. Projeto Geométrico 13

2.1.3.1. Elementos do Projeto Geométrico que Influenciam na Drenagem 14

2.1.3.1.1. Superlargura 14

2.1.3.1.2. Superelevação 14

2.2. Principais Elementos de Drenagem 15

2.3. Dimensionamento da drenagem 18

2.3.1. Comprimento Crítico 18

2.3.2. Dimensionamento das Descidas D'água 18

2.3.3. Dimensionamento Hidráulico de Bueiro 19

2.4. Estudos e Projetos de Drenagem de Outras Vias 23

2.4.1. Estudo de Caso da Rodovia SC135 Km 112-119,5 23

2.4.2. Avaliação do Projeto de Drenagem de Transposição de Talvegues da Rodovia Municipal que Interliga a Rodovia MG-457 ao Município de Passa Vinte/Minas Gerais 24

2.4.3. Projeto Executivo de Engenharia para Obras de Duplicação da Rodovia BR-316 25

3. MÉTODO 27

3.1. Caracterização da Área de Estudo 27

3.2. Descrição do Método 29

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 33

4.1. Definição das Larguras dos Taludes de Contribuição (Etapa A1) 33

4.2. Determinação dos Parâmetros Am, Pm e Rh das Sarjetas (Etapa A2) . 35

4.3. Determinação do Comprimento Crítico das Sarjetas (Etapas A3 e A4) 35

4.4. Cálculo da Velocidade de Escoamento das Sarjetas (Etapa A5) 40

4.5. Escolha da Seção-Tipo Mais Econômica (Etapa B1) 42

4.6. Gráfico Declividade x Comprimento Crítico (Etapa B2) 44

4.7. Vazão Real nas Sarjetas (Etapa B3) 45

4.8. Dimensionamento das Valetas 48

4.9. Dimensionamento das Descidas D'Água (Etapas C1 e C2) 56

4.10. Dimensionamento dos Bueiros de Greide (Etapas C3 a C8) 59

4.11. Desenhos em CAD do Projeto (Etapa D1) 65

4.12. Considerações Finais 67

5. CONCLUSÃO 69

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros 70

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 71

APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DE BUEIROS NO REGIME SUBCRÍTICO 75

APÊNDICE B – TABELA DAS LARGURAS DOS TALUDES DE CONTRIBUIÇÃO 77

APÊNDICE C – DIVISÃO DOS TRECHOS DA RODOVIA 80

APÊNDICE D – TABELA DE DIMENSIONAMENTO DAS VALETAS 82

APÊNDICE E – TABELA DE CORREÇÃO DA VAZÃO SUPORTADA EM VALETAS COM VELOCIDADE EXCESSIVA 85

APÊNDICE F – CÁLCULO DA ALTURA DE LÂMINA D'ÁGUA NOS BUEIROS CELULARES 86

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A construção de estradas é uma das maiores atividades executadas pela engenharia civil. Contudo, essa construção deve garantir de forma eficiente a segurança das pessoas e de todos os veículos que circulam pelas rodovias. Entre todos os componentes das rodovias, o pavimento é um dos principais e, para que tenha um bom desempenho e longa vida útil, faz-se necessário um sistema eficiente de drenagem (LIMA ET AL., 2022).

Os sistemas de drenagem apresentam-se como um conjunto de operações e instalações de equipamentos destinados a remover os excessos de água, sendo assim componentes essenciais nas obras rodoviárias. Assim, em hipótese alguma é possível projetar uma rodovia sem que haja um correto estudo a respeito da captação e condução da água - que, sob qualquer forma, venha a atingir o corpo estradal - para um local adequado. Em vista disso, é necessário que todo projeto de construção de uma via leve em consideração o escoamento superficial da água – através da drenagem superficial e de transposição de talvegue – e, em alguns casos, a sua infiltração – através da drenagem subsuperficial e de drenagem profunda.

Um bom projeto de drenagem é fundamental para que a rodovia apresente maior durabilidade e segurança viária. Segundo Campos e Mota (2020), danos ao pavimento podem ser citados como consequência das deficiências nos processos de drenagem, causando prejuízos significativos à integridade humana e dos veículos. Logo, uma drenagem adequada é essencial para a prevenção de patologias nos pavimentos, como erosão, perda da capacidade de suporte da camada, trincas nos revestimentos e o fenômeno da aquaplanagem.

Sendo assim, a água é um agente que interfere na segurança da via ao provocar defeitos na estrutura, promover deslizamentos de terra e diminuir o atrito da pista com o pneu do veículo. Além disso, a falta de drenagem pode acarretar no transbordamento da água para a pista de rolamento, gerando custos com interrupção do tráfego ao impedir a passagem de caminhões com gêneros alimentícios, materiais hospitalares e cargas diversas pela rodovia. Portanto, é fundamental a existência da drenagem não somente por conta da qualidade do pavimento, mas também para

possibilitar o deslocamento de pessoas, cargas e mercadorias para seus respectivos destinos.

Para fazer o projeto de drenagem de uma rodovia, é necessário conhecer a geometria da obra (através do projeto geométrico e das curvas de nível do local), para que assim seja possível interpretar o encaminhamento das águas pluviais e saber quais são as declividades do greide, se há superelevação e superlargura, e as larguras das faixas de tráfego e acostamento. Ademais, conhecimentos no âmbito da hidrologia são de vital importância para que se possa estimar a vazão de contribuição ao elemento de drenagem, assim como no campo da hidráulica para o cálculo da vazão suportada pelos dispositivos.

É importante ressaltar que o DNIT possui um álbum de projetos-tipo com diversos elementos de drenagem, que vão desde dispositivos superficiais até profundos. A partir disso, cabe ao projetista escolher a seção-tipo que resulte no projeto mais econômico dentre aqueles que atendem às vazões do ponto de vista técnico.

Nesse sentido, o presente trabalho irá realizar o projeto de drenagem superficial do trecho de uma rodovia em Tucuruí a partir do projeto geométrico feito por Pinheiro (2021), que realizou um estudo acerca do melhor traçado para o local em questão, levando em conta as condições do terreno e a presença de uma vasta área alagada no trajeto.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

O objetivo principal deste trabalho é efetuar o projeto de drenagem superficial mais econômico para um trecho de rodovia a ser construído em Tucuruí – PA.

1.2.2. Específicos

- Definir uma equação para o cálculo da chuva de projeto;
- Delimitar nas bordas da rodovia os trechos em corte e em aterro;
- Calcular as larguras dos taludes de corte e de aterro;
- Indicar a sarjeta mais solicitada e sua respectiva vazão de contribuição;

- Indicar a valeta mais solicitada e sua respectiva vazão de contribuição;
- Indicar as seções-tipo mais econômicas;
- Comparar o consumo de materiais para um bueiro tubular e um celular.

1.3. Justificativa

A drenagem é um item essencial na infraestrutura das rodovias, pois além de ampliar a sua vida útil, promove a proteção das obras de contenção, diminuição da deterioração no entorno e reduz despesas com a conservação de vias. Logo, um sistema de drenagem eficaz auxilia na remoção segura da água e evita o seu excesso de forma superficial e profunda.

Um dos principais motivos para realizar a drenagem de um pavimento está atrelado à estrutura do solo e sua estabilidade. Afinal, o escoamento inadequado da água pode gerar, dentre outros problemas, o fenômeno da erosão, fazendo com que toda estrutura entre em colapso. Por conta disso, realizar uma drenagem adequada ajuda a garantir que o subleito permaneça suficientemente firme, sem movimentos imprevistos ou indesejados.

Levando em conta que a rodovia proposta por Pinheiro (2021) se encontra em um terreno bastante irregular, um encaminhamento incorreto da água pode se tornar extremamente prejudicial à via. Nesse sentido, a drenagem em questão pode ajudar a evitar a ação danosa da água no local, prevenindo a perda de suporte das camadas, o fenômeno da aquaplanagem, a desagregação dos materiais constituintes do pavimento e, com isso, aumentar a segurança viária dos usuários que transitarem pelo local.

Dessa forma, é possível inferir que a rodovia em questão só terá durabilidade e segurança com uma boa drenagem. Dentre as diversas soluções técnicas mais corretas, deve-se escolher a solução mais econômica para o projeto.

1.4. Estrutura do Trabalho

O trabalho será estruturado em cinco capítulos. Além desta introdução – que apresenta as considerações iniciais, os objetivos e a justificativa do estudo – serão abordados: Revisão Bibliográfica, Método, Resultados e Conclusão.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica, que está dividida em 3 tópicos (pré-requisitos para o dimensionamento de drenagem de rodovias; dimensionamento da drenagem; estudos e projeto de drenagem de outras vias). Aqui são apresentados conceitos, trabalhos, artigos e referências técnicas que auxiliam na compreensão e no desenvolvimento do tema.

O terceiro capítulo aborda o método de desenvolvimento do projeto, caracterizando a área de estudo e descrevendo os passos necessários para um correto dimensionamento da drenagem da rodovia.

No quarto capítulo são apresentados os resultados encontrados e é feita uma análise a respeito dos valores calculados, discutindo-os e confrontando, quando possível, com resultados presentes em outras literaturas.

O quinto e último capítulo traz as considerações finais do trabalho e as sugestões para as próximas pesquisas nessa linha de conhecimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor fundamentar o trabalho, abordam-se neste capítulo importantes conceitos e literaturas as quais discorrem sobre assuntos como dispositivos de drenagem, chuva de projeto, área da bacia de contribuição e métodos de dimensionamento - além de estudos e projetos de drenagem de outras vias -, visando com isso apresentar grande parte do conhecimento necessário para uma plena compreensão a respeito do tema de drenagem de rodovias.

2.1. Pré-requisitos para o dimensionamento de drenagem de rodovias

Para se realizar um projeto de drenagem, é importante que sejam definidos alguns conceitos para um melhor entendimento acerca do assunto. Em virtude disso, é necessário ter conhecimentos na área da Hidrologia, para que se possa estimar a vazão de contribuição ao elemento de drenagem, em Hidráulica, para calcular a vazão suportada pelo dispositivo, além do projeto geométrico da via, para que assim possa ser determinado o tamanho das bacias de contribuição para cada elemento de drenagem (visando o cálculo da vazão de contribuição) e as declividades com as quais os dispositivos serão construídos (com o intuito de determinar a vazão suportada).

2.1.1. Hidrologia

Para efetuar o cálculo da vazão de contribuição para o dispositivo de drenagem, é necessário utilizar o Método Racional, descrito pela Equação 1. Os parâmetros utilizados nesta Equação serão detalhados nos subitens sequentes.

$$Q = \frac{C\ x\ i\ x\ A}{3{,}6\ x\ 10^6} \qquad (1)$$

Em que:

C é o Coeficiente de Escoamento Superficial (adimensional);

i é a Intensidade Pluviométrica (mm/h);

A é a Área de Contribuição da bacia ou plataforma (m²).

2.1.1.1. Coeficiente de Escoamento Superficial

Coeficiente de deflúvio, coeficiente de escoamento superficial ou ainda coeficiente de “run-off” é a relação entre o volume de água escoado superficialmente e o volume precipitado (JABÔR, 2019).

O coeficiente de escoamento varia em função das características da bacia hidrográfica, tais como declividade do terreno, vegetação, infiltração no solo que formam e alimentam os lençóis freáticos e interceptação para uso na agricultura e consumo humano.

Para aplicação em drenagem urbana, alguns valores de coeficientes de escoamento superficial típicos utilizados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de Escoamento Superficial / Run-Off

TIPO DE SUPERFÍCIE	COEFICIENTE DE DEFLÚVIO “c”
Ruas:	
Asfalto	0,70 a 0,95
Concreto	0,80 a 0,95
Tijolos	0,70 a 0,85
Trajetos de acesso a calçadas	0,75 a 0,85
Telhados	0,75 a 0,95
Gramados; solos arenosos:	
Plano, 2%	0,05 a 0,10
Médio, 2 a 7%	0,10 a 0,15
íngreme, 7%	0,15 a 0,20
Gramados; solo compacto:	
Plano, 2%	0,13 a 0,17
Médio, 2 a 7%	0,18 a 0,22
Íngreme, 7%	0,15 a 0,35

Fonte: Manual de Hidrologia Básica Para Estruturas de Drenagem (DNIT, 2005)

É importante frisar que, quase sempre, os terrenos atravessados por uma rodovia não são homogêneos. Para esses casos, é conveniente obter o coeficiente de deflúvio de uma bacia pela média ponderada dos coeficientes das diferentes superfícies que a compõem, sendo os pesos proporcionais às áreas dessas superfícies (DNIT, 2005). A Equação 2 apresenta a forma de se obter o coeficiente de escoamento ponderado.

$$Cmédio = \frac{C1\ x\ L1 + C2\ x\ L2}{L1 + L2} \qquad (2)$$

Em que:

C1 = Coeficiente de escoamento da superfície 1.

C2 = Coeficiente de escoamento da superfície 2.

L1 = Largura de contribuição ocupada pela superfície 1.

L2 = Largura de contribuição ocupada pela superfície 2.

2.1.1.2. Chuva de Projeto

A intensidade máxima pontual pode ser determinada através das relações intensidade-duração-frequência (IDF) das chuvas. Essas relações são obtidas através de uma série de dados de chuvas intensas, suficientemente longas e representativas do local do projeto (FESTI, 2010). As equações IDF possuem caráter local e a baixa densidade de pontos de coleta aliada ao pequeno período de observação normalmente disponíveis geram dificuldades nessa determinação. Segundo o DNIT (2005), quando não há dados pluviográficos nas proximidades do local da obra, deve-se recorrer a dados bibliográficos.

Considerando que as equações de chuvas intensas têm sido usadas como ferramenta importante para o dimensionamento de obras hidráulicas e devido à grande carência de informações relativas à essas equações, o artigo de Souza et. Al. (2012) buscou obter as relações de intensidade, duração e frequência de precipitação pluvial para o Estado do Pará, utilizando o método de desagregação da chuva de 24h. Para isso, foram usadas como base as séries históricas de dados pluviométricos de 74 cidades do Estado do Pará, obtidas no Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas – ANA.

Em complemento, o trabalho de Rêgo e Mendes (2021) procurou gerar curvas intensidade-duração-frequência (IDF) e equações de chuvas intensas para 12 municípios paraenses, a fim de abranger todo o território do Estado. Para isso, foram analisadas as séries históricas de precipitação disponíveis no Portal HIDROWEB e, a partir delas, obtidas as precipitações máximas anuais, médias e desvios-padrão.

A determinação da chuva de projeto, segundo Rêgo e Mendes (2021), para a cidade de Tucuruí - local do projeto de drenagem desenvolvido nesse trabalho - é realizada a partir da Equação 3.

$$I = \frac{1048{,}9029\ x\ TR^{0{,}0843}}{(t + 6{,}3085)^{0{,}7174}} \qquad (3)$$

Em que:

TR é o Tempo de Recorrência (anos);

tc é o Tempo de Concentração (min).

2.1.1.2.1. Tempo de Recorrência (TR)

O tempo de recorrência (período de recorrência, tempo de retorno) permite estimar o tempo, em anos, em que um evento de determinada magnitude pode ocorrer ou ser superado (SILVA et al., 2021). Em dispositivos de drenagem, esse tempo se refere a enchentes de projeto que orientarão o dimensionamento, ao passo que as obras suportem enchentes de risco (SOUZA, 2019).

A escolha e justificativa de um determinado período de retorno está atrelada a uma análise de fatores como economia, tipo de estrutura, facilidade de reparos e segurança da obra. Períodos de retorno maiores levam a maiores valores de vazão de pico, o que, por consequência, torna a obra mais segura, porém mais cara.

A Tabela 2 apresenta os tempos de recorrência recomendados pelo DNIT para os diversos tipos de elementos de drenagem.

Tabela 2 -Tempos de Recorrência Recomendados pelo DNIT

Tipo de Elemento		TR (anos)
Dren. Superficial		5 a 10
Dren. Sub-superficial		10
Dren. Profunda		1
Bueiros Tubulares	Canal	10
	Orificio	25
Bueiros Celulares	Canal	25
	Orificio	50
Pontilhão		50
Ponte		100

2.1.1.2.2. Tempo de Concentração (tc)

É o intervalo de tempo entre o início da precipitação e o instante em que toda a bacia contribui para a vazão na seção estudada (JABÔR, 2019). Em outras palavras, é o tempo necessário para o escoamento ocorrer do ponto mais remoto da bacia hidrográfica até o ponto de convergência de um curso d'água.

Segundo Gribbin (2012), cada bacia de drenagem tem seu próprio tempo de concentração, dependendo do tamanho, forma, declividade e condições do solo.

A Tabela 3 informa os tempos de concentração recomendados pelo DNIT para diversos tipos de elementos de drenagem.

Tabela 3 - Tempos de Concentração Recomendados pelo DNIT

Tipo de Dispositivo	tc (min)
Dren. Superficial	5
Dren. Sub-superficial	60
Dren. Transp. Talvegues	10

De acordo com o tipo de elemento de drenagem e de posse da equação de chuva e dos pares de TR e tc,, o projetista pode determinar a chuva de projeto para o local da obra.

2.1.1.3. Área de Bacia

Bacia hidrográfica ou bacia de contribuição de uma seção de um curso d'água é a área geográfica coletora de água de chuva que, escoando pela superfície do solo, atinge a seção considerada (MARTINS, 1976 apud JABÔR, 2019, pg. 39).

O limite superficial da bacia hidrográfica é chamado de divisor de águas. A delimitação do divisor de águas da bacia é feita através de uma planta topográfica, e ao redor de um curso de água, sendo necessária para o cálculo do escoamento neste curso d'água (GRIBBIN, 2012).

O Método Racional tem sido usado preferencialmente em bacias de pequena área, mas nada indica que não seja aplicável a bacias maiores. Naturalmente, para bacias maiores torna-se necessário corrigir as precipitações através do fator de redução para a área, uma vez que a distribuição na superfície da bacia não é uniforme. De maneira geral, bacias de pequeno porte (inferiores a 2 km²) ou em áreas urbanas utilizam essa expressão para determinar a descarga de projeto (DNIT, 2006).

Ao considerar a análise de rodovias, as bacias usadas na drenagem superficial podem apresentar áreas bem pequenas, que muitas vezes são formadas apenas pela plataforma da via - como é o caso de sarjetas de aterro. Para esse cenário, leva-se em consideração a largura da plataforma (que em trechos curvos pode ser ampliada) e a extensão da rodovia até um ponto de desague (que corresponde ao comprimento crítico).

2.1.2. Hidráulica

Para efetuar o cálculo da vazão suportada pelo elemento de drenagem, é necessário que seja aplicada a fórmula de Manning, descrita pela Equação 4. Os parâmetros utilizados nesta Equação serão detalhados nos subitens sequentes.

$$Q = \frac{Am\ x\ Rh^{\frac{2}{3}}\ x\ I^{\frac{1}{2}}}{n} \tag{4}$$

Em que:

Am é a Área Molhada (m²);

Rh é o Raio Hidráulico (m);

I é a Declividade Longitudinal (m/m);

n é o Coeficiente de Rugosidade de Manning (adimensional).

2.1.2.1. Área Molhada

Como os condutos livres podem apresentar as formas mais variadas (podendo ainda funcionar parcialmente cheios), torna-se necessário fazer a distinção entre seção de um conduto (total) e seção de escoamento (área molhada).

Assim, denomina-se como área molhada de um conduto a área útil de escoamento numa seção transversal. De forma mais simplificada, área molhada é toda área da seção transversal do dispositivo de drenagem molhada pela água.

A área molhada dos elementos de drenagem é calculada pelas fórmulas básicas da geometria, de acordo com a forma da seção transversal (triangular, retangular, trapezoidal ou circular) do dispositivo de drenagem.

2.1.2.2. Raio Hidráulico

O raio hidráulico é um parâmetro importante no dimensionamento de canais, dutos, tubos e outros componentes das obras hidráulicas. De forma bem simples, se trata da relação entre a área molhada e o perímetro molhado de uma estrutura de drenagem, sendo este definido pelo perímetro de contato entre o conduto e o líquido, considerando fundos e paredes. Assim, o raio hidráulico é definido pela Equação 5.

$$Rh = \frac{Am}{Pm} \tag{5}$$

Em que:

Am é a Área Molhada (m²);

Pm é o Perímetro Molhado (m).

2.1.2.3. Declividade do Canal

A declividade do canal é o quociente entre o desnível do fundo do canal (diferença de cotas de montante e jusante) e o seu comprimento (L), medido no plano horizontal.

As declividades dos elementos de drenagem podem acompanhar as declividades do greide da rodovia (como por exemplo em sarjetas de corte e aterro), as declividades do terreno natural após a terraplenagem (a exemplo das descidas d'água) ou ainda serem definidas pelo projetista de drenagem (como é o caso de bueiros de greide).

2.1.2.4. Coeficiente de Rugosidade de Manning

Determinar o coeficiente de rugosidade de Manning (n) significa estimar a resistência de escoamento de um canal (CHOW, 1959). O coeficiente de rugosidade depende da natureza do material utilizado no revestimento do canal (como uma tentativa de mensurar sua aspereza) e é representado como "n" na Equação de Manning (GRIBBIN, 2012).

Segundo Porto (2006), a fórmula de Manning é a mais popular em projetos de canais e seu coeficiente é comumente especificado de acordo com tabelas e não com base na rugosidade absoluta equivalente originada da medida em campo. O autor também observa que os números tabelados são valores médios indicativos que tem interferência crucial na aplicação da fórmula de Manning e, consequentemente, no dimensionamento de canais.

A Tabela 4 informa alguns valores de "n" recomendados pelo DNIT para os diversos materiais que compõem os elementos de drenagem.

Tabela 4 - Coeficientes de Rugosidade de Manning Recomendados pelo DNIT

Canais abertos não revestidos		
Terra em segmento reto e uniforme		
Limpa, recentemente com pletada	0,016	0,018
Limpa, após intempérie	0,018	0,022
Saibro, seção uniforme, limpa	0,022	0,025
Com grama curta, pouca vegetação	0,022	0,027
Em solo pedregulhoso, limpo	0,022	0,025
Terra, em segmento sinuoso		
Sem vegetação	0,023	0,025
Grama, alguma vegetação	0,026	0,030
Vegetação densa ou plantas aquáticas em canais profundos	0,030	0,035
Fundo em terra, paredes em pedra	0,028	0,030
Fundo em pedra e margens cobertas de vegetação	0,025	0,035
Fundo em seixos,e paredes limpas	0,030	0,040
Escavado com dragline ou dragado		
Sem vegetação	0,025	0,028
Arbustos nas margens	0,035	0,50
Cortes em rocha		
Baseada na seção do projeto	-	0,035
Lisa e uniforme	0,025	0,035
Áspera e irregular	0,035	0,040

Fonte: Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006)

2.1.3. Projeto Geométrico

Projeto geométrico é a fase do projeto de estradas que estuda as diversas características geométricas do traçado em função das leis do movimento, características de operação dos veículos, reação dos motoristas, segurança e eficiência das estradas e volume de tráfego (PIMENTA, 2020).

O projeto geométrico é fundamental para que se possa conhecer as declividades transversais e longitudinais adotadas pelo projetista, bem como as larguras de faixas de tráfego, acostamento e taludes – elementos estes essenciais para um adequado dimensionamento de dispositivos de drenagem em rodovias. Além disso, o projeto geométrico auxilia na definição dos valores de C e A na equação do método racional, pois delimita a área da bacia de contribuição e dá indicação de trechos pavimentados ou não pavimentados, visando a determinação do valor do C ponderado.

O projeto geométrico ajuda a definir os valores de declividade dos dispositivos de drenagem e, com isso, é possível determinar a capacidade de vazão do elemento por meio da fórmula de Manning. Ao mesmo tempo, as declividades influenciam diretamente nas dimensões adotadas para os dispositivos, tendo em vista que inclinações muito baixas podem levar a uma dificuldade de escoamento, exigindo assim que os elementos tenham capacidade hidráulica maior para evitar o acúmulo de água e, consequentemente, uma situação de transbordamento.

Portanto, um projeto de drenagem só pode ser realizado após ter sido feito o projeto geométrico da rodovia, para que dessa forma se tenha conhecimento de todos os parâmetros considerados essenciais para o dimensionamento.

2.1.3.1. Elementos do Projeto Geométrico que Influenciam na Drenagem

2.1.3.1.1. Superlargura

Em uma curva, como o veículo é rígido e não pode acompanhar a curvatura da via, é necessário aumentar a largura da pista para que permaneça a distância mínima entre veículos que existia no trecho em tangente. Além disso, o motorista tem maior dificuldade de avaliar distâncias transversais em curva, o que requer aumento das distâncias de segurança consideradas em tangente. A esse acréscimo de largura, dá-se o nome de superlargura (DNIT, 2010).

A superlargura influencia em um projeto de drenagem devido ao aumento na largura de contribuição da plataforma, o que faz com que um maior volume de água seja captado pelos dispositivos e, consequentemente, eleva a necessidade de uma capacidade hidráulica maior do elemento.

2.1.3.1.2. Superelevação

As rodovias apresentam nas curvas seções inclinadas em relação ao plano horizontal com o propósito de contrabalançar o efeito da aceleração centrífuga. Dá-se o nome de superelevação em um ponto da curva ao valor da tangente do ângulo formado pela reta de maior declive da seção com o plano horizontal (DNER, 1999).

A área de contribuição utilizada em projetos de drenagem é determinada a partir da largura da plataforma e, por isso, o projeto geométrico da rodovia é fundamental. Para

o caso de trechos em tangente, o valor será definido pelo somatório das larguras de uma faixa de tráfego (ou da quantidade de faixas referente à metade da plataforma), um acostamento e pela “boca” do elemento de drenagem. Já para o caso de trechos em curva, é necessário que esse somatório leve em conta as larguras das duas faixas de tráfego (ou da quantidade total de faixas da rodovia), do acostamento, da “boca” do elemento de drenagem e, se for o caso, da superlargura presente na via.

Dito isso, é importante levar em conta a superelevação na elaboração de um projeto de drenagem devido a maior velocidade de escoamento das águas pluviais que incidem sobre a plataforma da via para as sarjetas, o que leva a um aumento da possibilidade de transbordamento do dispositivo. Assim, entende-se que a superelevação afeta a bacia de contribuição para as sarjetas.

2.2. Principais Elementos de Drenagem

Os elementos de drenagem a serem utilizados nos projetos são definidos a partir do dimensionamento e de suas respectivas funções, aliados a aspectos técnicos e econômicos. Os principais dispositivos, suas funções, formas e imagens estão consolidados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo dos Elementos de Drenagem

Elemento de Drenagem	Função	Formas	Imagem
Sarjeta de Corte	- Impedir a erosão do bordo do pavimento e do pé de corte. - Aumentar o comprimento crítico. - Impedir o fenômeno da aquaplanagem.	Triangular Trapezoidal	

Elemento de Drenagem	Função	Formas	Imagem
Sarjeta de Aterro	- Impedir a erosão na borda do acostamento e no talude de aterro. - Semelhante às sarjetas de corte.	Triangular Trapezoidal	
Valeta de Proteção de Corte	- Impedir que as águas das encostas atinjam a rodovia. - Evitar a sobrecarga de volume d'água na sarjeta. - Reduzir o risco de desestabilização do talude de corte.	Triangular Trapezoidal	
Valeta de Proteção de Aterro	- Interceptar as águas que escoam a montante do terreno. - Receber as águas das sarjetas e valetas de corte.	Retangular Trapezoidal	
Descidas D'Água	- Conduzir as águas captadas por outros dispositivos de drenagem. - Conduzir as águas das valetas (cortes). - Conduzir as águas das sarjetas de aterro (aterro).	Retangular Semicircular (meia cana) Tubular	

Elemento de Drenagem	Função	Formas	Imagem
Saídas D'Água	- Encaminhar as águas para tubulações ou outros dispositivos de drenagem.	Não especificado pelo Manual de Drenagem do DNIT.	
Caixas Coletoras	- Coletar as águas das sarjetas. - Coletar as águas a montante de bueiros de transposição de talvegue. - Permitir a inspeção dos condutos. - Possibilitar mudanças de dimensão de bueiros, de declividade e direção.		
Bueiros	- Permitir a passagem livre das águas sob às estradas.	Tubulares Celulares Elipses Ovóides	
Dissipadores de Energia	- Dissipar a energia do fluxo d'água, reduzindo a velocidade para que não haja risco de erosão.		

É importante frisar que todas as informações da Tabela resumo foram obtidas a partir do Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006).

2.3. Dimensionamento da drenagem

2.3.1. Comprimento Crítico

O comprimento crítico é definido como o máximo comprimento de utilização do dispositivo para que não haja transbordamento d'água para a pista, o que afetaria a segurança da via através da aquaplanagem e/ou transbordamento para o talude de aterro, podendo dar início a um processo de erosão. O cálculo desse parâmetro se aplica aos seguintes elementos:

- Sarjetas de corte;
- Sarjetas de aterro;
- Valeta de Proteção de Corte;
- Valeta de Proteção de Aterro.

A partir das equações do Método Racional e de Manning apresentadas anteriormente, pode-se igualar as vazões e realizar o desmembramento da área da bacia em Largura (L) x Comprimento (d). Assim, é possível calcular o comprimento crítico do elemento por meio da Equação 6.

$$dcrít = 3{,}6\ x\ 10^6 \frac{Am\ x\ Rh^{\frac{2}{3}}\ x\ I^{\frac{1}{2}}}{n\ x\ C\ x\ i\ x\ L} \qquad (6)$$

2.3.2. Dimensionamento das Descidas D'água

O dimensionamento hidráulico consiste em calcular as dimensões da descida d'água de forma que esta possa conduzir ao desague seguro a vazão a ela destinada por outros dispositivos de drenagem superficial (DNIT, 2006).

O dimensionamento pode ser feito por dois métodos, a saber:

- Pela fórmula empírica, baseada em experiências de laboratório;
- Através da teoria hidráulica do movimento uniformemente variado.

A escolha do método depende da precisão que se queira dar aos cálculos. Evidentemente, o segundo método é mais preciso, embora o primeiro possa ser considerado satisfatório para obras de repercussão econômica menos significativa (DNIT, 2006).

Para o dimensionamento realizado no presente trabalho, será adotado, para fins de simplificação, o método empírico - denominado de “Método I”.

- ***Método I***

Neste caso, o dimensionamento pode ser feito através da Equação 7, fixando-se o valor da largura (L) e determinando-se o valor da altura (H).

$$Q = 2{,}07\ x\ L^{0,9}\ x\ H^{1,6} \tag{7}$$

Em que:

Q é a descarga de projeto a ser conduzida pela descida d’água (m³/s);

L é a largura da descida d’água (m);

H é a altura média das paredes laterais da descida (m).

Além do dimensionamento, é necessário realizar o cálculo da velocidade da água no pé da descida. A Equação 8 determina essa velocidade.

$$V = \sqrt{2\ x\ g\ x\ h} \tag{8}$$

Em que:

V é a velocidade da água na base da descida (m/s);

g é a aceleração da gravidade (m/s²);

h é o desnível ou diferença de cotas da descida d’água (m).

2.3.3. Dimensionamento Hidráulico de Bueiro

Para o dimensionamento hidráulico dos bueiros admite-se que eles possam funcionar como canais, vertedouros ou como orifícios.

O regime de escoamento desses dispositivos pode ser dividido em 3 categorias:

a) Crítico, ocorrendo o mínimo de energia;
b) Rápido, definido por ter uma declividade superior à do regime crítico;
c) Subcrítico, definido por uma declividade inferior à do regime crítico.

No caso de bueiros trabalhando como canais (que é o caso a ser adotado no projeto), o dimensionamento é baseado em dois processos (ambos em função da declividade), sendo um para o regime subcrítico e outro para o regime crítico e rápido.

Em relação à geometria, os bueiros podem apresentar forma tubular ou celular, com apenas uma linha ou até 3 linhas – a depender do volume de água a ser escoado.

Sendo assim, há várias formas de dimensionar bueiros, porém será detalhado apenas o cálculo dos bueiros tubular e celular, trabalhando como canal, em regime subcrítico.

- ***Regime subcrítico***

Sempre que a declividade do bueiro for inferior à crítica, o dimensionamento (seção e velocidade do fluxo) será obtido por intermédio das equações gerais do fluxo.

- Bueiros Tubulares

Para determinação do diâmetro inicial do tubo, utiliza-se a Equação 9:

$$D = \left(\frac{Q\ x\ n}{0{,}3047\ x\ I^{\frac{1}{2}}} \right)^{3/8} \qquad (9)$$

Em que:

D é o diâmetro interno do tubo (m);

Q é a vazão no tubo (m^3/s);

n é o coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional);

I é a declividade do bueiro (m/m).

Para calcular a vazão suportada pelo tubo, utiliza-se a Equação 10:

(10)

$$Q = Kq\ x\ D^{8/3}\ x\ \frac{I^{1/2}}{n}$$

Em que:

Kq é a relação de vazão obtida na tabela de tubos parcialmente cheio (adimensional).

O cálculo do regime de escoamento é feito a partir da Equação 11:

$$Ic = \left(32{,}82\ x\ \frac{n^2}{D^{\frac{2}{3}}}\right) x\ 100 \tag{11}$$

Enquanto que, para o cálculo da velocidade de escoamento, aplica-se a Equação 12:

$$V = Kv\ x\ D^{2/3}\ x\ \frac{I^{1/2}}{n} \tag{12}$$

Em que:

V é a velocidade no tubo (m/s);

Kv é a relação da velocidade obtida na tabela de tubos parcialmente cheios;

O DNIT tem adotado uma folga mínima para o elemento, isto é, uma altura livre entre a lâmina d'água e a laje superior do bueiro. Desse modo, a altura do bueiro passa a ser calculada segundo a Equação 13:

$$H = \frac{d}{0{,}80} \tag{13}$$

Em que:

H é a altura da lâmina d'água (m);

d é o diâmetro do tubo (m).

Para a conclusão do dimensionamento, segue-se o método descrito no Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT, detalhado no Apêndice A do trabalho.

- Bueiros Celulares

Para realizar o cálculo da declividade crítica, utiliza-se a Equação 14:

$$Ic = 2{,}60\ x\ \frac{n^2}{\sqrt[3]{H}} x\ \left(3 + \frac{4H}{B}\right)^{4/3} \tag{14}$$

Em que:

Ic é a declividade crítica do bueiro (%);

H é a altura adotada para o bueiro (m);

B é a largura da base adotada para o bueiro (m).

Para calcular a vazão suportada pelo elemento, utiliza-se a Equação 15:

$$Q = Kq\ x\ \frac{I^{1/2}}{n} \tag{15}$$

Sendo Kq equivalente ao produto da área molhada com o raio hidráulico na fórmula de Manning, calculado segundo a Equação 16.

$$Kq = \sqrt[3]{\frac{(B\ x\ H)^5}{(B + 2\ x\ H)^2}} \tag{16}$$

Enquanto que, para a expressão de velocidade, tem-se a Equação 17:

$$V = Kv\ x\ \frac{I^{1/2}}{n} \tag{17}$$

Sendo Kv equivalente ao raio hidráulico, representado pela Equação 18.

$$Kv = \left(\frac{B\ x\ H}{B + 2xH}\right)^{2/3} \tag{18}$$

Novamente, para a conclusão do dimensionamento, segue-se o método descrito no Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT, detalhado no Apêndice A do trabalho.

2.4. Estudos e Projetos de Drenagem de Outras Vias

Para uma melhor compreensão acerca de projetos de drenagem e sua importância, é interessante que seja apresentado outros estudos e pontos de vista sobre o assunto. Com esse objetivo, buscou-se projetos e monografias que retratassem o dimensionamento propriamente dito, os fatores que influenciam na escolha do elemento mais adequado para o local e a avaliação de uma rodovia sem os dispositivos de drenagem ou com má conservação destes.

2.4.1. Estudo de Caso da Rodovia SC135 Km 112-119,5

Utilizando um trecho com aproximadamente 32,6km de extensão como objeto de estudo, Alves (2019) definiu uma região da rodovia SC-135 com início em Caçador-SC e final em Videira-SC para efetuar a análise do sistema de drenagem local. Esta análise foi feita com base na realização de um inventário da rodovia, no intuito de analisar a quantidade exata de cada elemento presente na via.

Além dos elementos, estiveram presentes nesse inventário, evidentemente, os problemas apresentados na rodovia, como obstruções em diversos elementos de drenagem, transbordamento de água na pista de rolamento, falta de estrutura, de conservação, de limpeza e de manutenção adequada.

Em um dos trechos analisados, foram apresentadas imagens de problemas de acúmulo de água na pista de rolamento e no acostamento. Já em outra imagem é mostrada uma grande quantidade de água que escorre pela plataforma da pista em decorrência da falta de sarjeta no local, além de mostrar um tubo circular de concreto que lança água diretamente no acostamento, atingindo com isso a pista de rolamento.

Após a conclusão das análises em cada trecho, foi constatado que a falta de manutenção e conservação periódica são as principais causas dos problemas diagnosticados, principalmente em se tratando de sarjetas, que na maioria das vezes apresentaram grande quantidade de vegetação, obstruções, erosões e estruturas danificadas.

2.4.2. Avaliação do Projeto de Drenagem de Transposição de Talvegues da Rodovia Municipal que Interliga a Rodovia MG-457 ao Município de Passa Vinte/Minas Gerais

Utilizando a rodovia municipal de Passa Vinte - MG como referência, Rocha (2013) analisou como foram definidos os tipos e tamanhos de bueiros instalados na rodovia a partir de uma comparação com o projeto local. Por meio dessa análise, observou-se que diversos fatores interferem na adoção dos mais variados tipos de dispositivos de drenagem, como levantamento topográfico, estudos geotécnicos, estudos hidrológicos e os métodos que serão utilizados para a construção do projeto (ROCHA, 2013).

O local onde a rodovia se encontra é caracterizado topologicamente como uma região montanhosa a ondulada (semelhante à rodovia na qual será realizado o projeto no presente trabalho), de classe rodoviária IV, com larguras de pista de rolamento de 3,50m e de acostamento de 1,20m.

O trabalho foi realizado a partir da determinação da melhor alternativa de bueiro para suportar a vazão a ser drenada pelas 7 bacias analisadas. Em virtude disso, bueiros do tipo tubular de concreto e tubular metálico foram dimensionados com o intuito de realizar uma comparação com os bueiros já instalados na rodovia.

Foi observado que a escolha pelo tipo de bueiro se deu pelo espaço para alocar esse dispositivo. No caso de uma das estacas, o bueiro que atenderia à vazão da bacia seria do tipo simples com diâmetro de 1,50m, mas como solução foi adotado um duplo com diâmetro de 1,00m. Isso evidencia que os valores obtidos em dimensionamento e que atendem a critérios mais econômicos nem sempre são exequíveis ou recomendáveis na prática.

Ainda segundo Rocha (2013), existem outros fatores que interferem na escolha do tipo e diâmetro do bueiro, como a determinação da delimitação da área de contribuição para o levantamento da vazão a ser escoada, a extensão do percurso escolhida, a determinação do ponto mais alto da bacia e do valor do tempo de escoamento superficial.

2.4.3. Projeto Executivo de Engenharia para Obras de Duplicação da Rodovia BR-316

As obras de duplicação da BR-316, situadas no segmento do km 67,6 ao km 112,6, entre os municípios paraenses de Castanhal e Santa Maria do Pará, envolveram um estudo completo do local, levando em conta estudos hidrológicos, topográficos e geotécnicos, além de projeto geométrico, de terraplenagem, de pavimentação e de drenagem.

O projeto de drenagem superficial objetivou identificar, captar e conduzir o desague seguro das águas provenientes das áreas adjacentes da rodovia e aquelas que se precipitem sobre o corpo da estrada de forma a resguardar a estabilidade e segurança da mesma.

Importante ressaltar que a faixa de tráfego da rodovia possui 3,60m, com acostamento de 1,50m em cada borda. A intensidade pluviométrica adotada foi de i=270mm/h, enquanto que o coeficiente de rugosidade de Manning foi de n=0,015.

As sarjetas adotadas foram a STC-02, localizadas em todos os cortes da rodovia, na margem dos acostamentos e terminando em pontos de saída convenientes. Este dispositivo foi escolhido de acordo com a demanda hidráulica do projeto, sendo ainda compatível com o tipo de sarjeta já existente na rodovia.

Para as valetas de proteção, os tipos VPA-04 e VPC-04 foram escolhidos por ter a seção mais econômica ainda com revestimento em concreto, visando evitar crescimento de vegetação, que é uma constante na área de projetos.

As entradas d’água utilizadas foram os tipos EDA-01 e EDA-02, sendo a primeira localizada em pontos onde era atingido o comprimento crítico do meio fio, enquanto que a segunda foi localizada nos pontos baixos.

Em se tratando de descidas d’água de aterros, o tipo DAR-03 foi escolhido por ter a seção mais econômica, ainda composta por concreto armado, visando uma maior durabilidade do dispositivo.

As caixas coletoras foram localizadas no canteiro central para evacuar as águas acumuladas na sarjeta SCC-02 e também para servir de estrutura de união dos bueiros existentes com as novas prolongações. O tipo CCS-01 foi escolhido pela

profundidade (2m), suficiente para possibilitar um recobrimento de 1,20m às tubulações dos bueiros de greide.

E, finalmente, os bueiros de greide adotados foram os tubulares de concreto armado, com diâmetro de 0,80m para evacuar as águas precipitadas nas caixas coletoras, em locais onde não há bueiros transversais existentes que possibilitem saída lateral das águas.

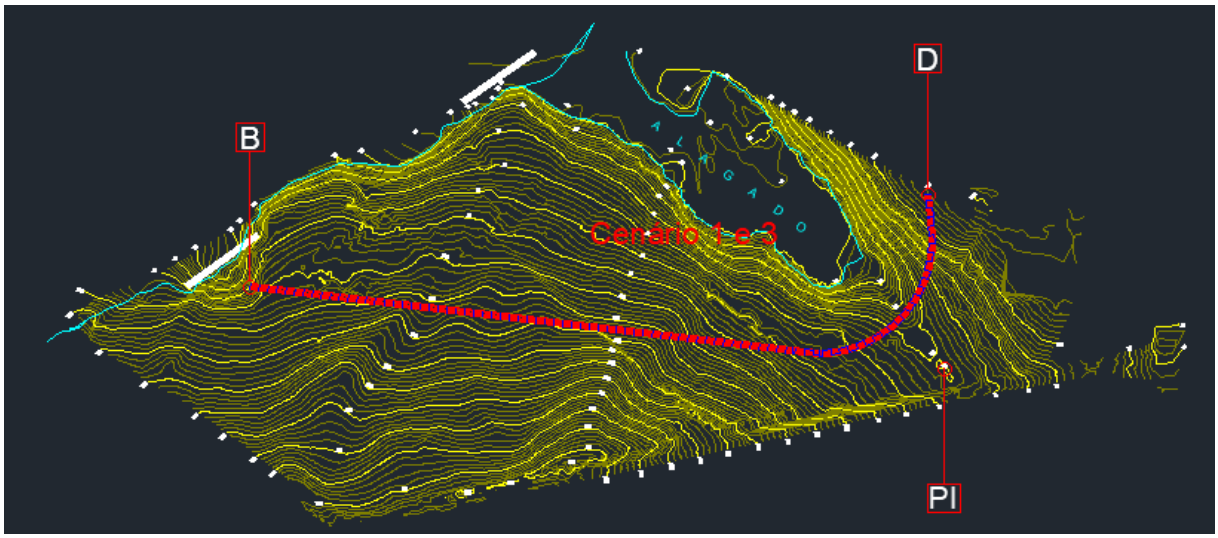
3. MÉTODO

Este capítulo é constituído pela caracterização da área de estudo, no qual é apresentado o local onde foi desenvolvido o projeto de drenagem superficial, suas características topográficas e hidrológicas e, por fim, o traçado geométrico da rodovia. Além disso, será descrito o passo a passo para a realização do projeto de drenagem superficial, contemplando cálculo de comprimentos críticos de sarjetas e valetas, determinação da seção-tipo mais econômica e dimensionamento de descidas d'água e bueiros de greide.

3.1. Caracterização da Área de Estudo

O projeto foi realizado tendo como base o estudo de Pinheiro (2021), no qual foi desenvolvido um projeto geométrico hipotético para o trecho de uma rodovia que dá acesso ao aeroporto da cidade de Tucuruí – PA. A Figura 1 mostra o traçado de rodovia utilizado como referência para o desenvolvimento do projeto.

Figura 1 - Traçado da Rodovia



Fonte: Pinheiro (2021)

As informações básicas do projeto geométrico desenvolvido por Pinheiro (2021) estão indicadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Informações Básicas da Rodovia

INFORMAÇÕES BÁSICAS DA RODOVIA		
Classe da Rodovia		III
Velocidade de Projeto (km/h)		60
Raio da Curva Horizontal (m)		210
Superelevação (%)		8,0
Superlargura (m)		0,6
Comprimento de Transição (m)		60
Largura da Faixa de Tráfego (m)		3,3
Largura do Acostamento (m)		2,0
Extensão das Rampas (m)	Rampa 1	625,0
	Rampa 2	835,0
	Rampa 3	313,6
Declividade Longitudinal (%)	Rampa 1	2,4
	Rampa 2	4,0
	Rampa 3	6,0
Devlicidade Transversal (%)	Faixa de Tráfego	2,0
	Acostamento	5,0

Em relação às características topográficas, é possível perceber que o terreno no qual a rodovia foi projetada se caracteriza como uma área bastante irregular, com desníveis bem acentuados e que, consequentemente, influenciam na declividade dos elementos de drenagem a serem projetados.

Para caracterizar as condições hidrológicas do local, a chuva de projeto é proveniente do estudo de Rêgo e Mendes (2021) para Tucuruí – PA. A Equação 3 - apresentada no capítulo anterior - indica como foi determinada a intensidade de precipitação adotada no projeto.

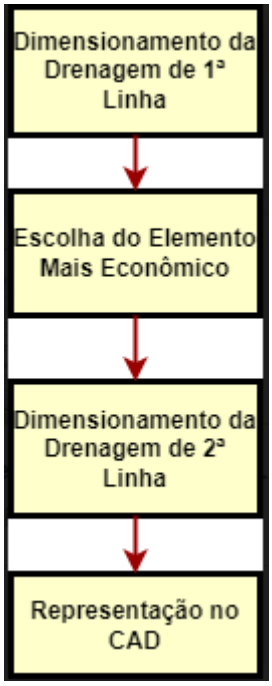
$$I = \frac{1048{,}9029\ x\ TR^{0{,}0843}}{(t + 6{,}3085)^{0{,}7174}} \qquad (3)$$

Para drenagem superficial, os pares de ponto (TR e tc) utilizados são TR = 10 anos e tc = 5 min. Assim, o valor adotado como chuva de projeto é I = 223,52 mm/h.

3.2. Descrição do Método

De posse do projeto geométrico da rodovia e das condições hidrológicas locais, é possível realizar o projeto de drenagem com base no fluxograma apresentado na Figura 2, que representa o método do trabalho.

Figura 2 - Fluxograma do Método Utilzado no Trabalho



Para se efetuar o projeto de drenagem superficial, foram seguidas as seguintes etapas:

- **Dimensionamento dos elementos de drenagem de 1ª linha, ou seja, cálculo dos comprimentos críticos das sarjetas e valetas de corte e aterro;**

A1) Definir as larguras de contribuição das faixas de corte e aterro em cada borda da pista, a partir da diferença de cotas entre o terreno natural e o greide projetado para a rodovia. Para determinar o valor da largura, utiliza-se a relação de 2:3 para regiões em aterro e 3:2 para regiões em corte. Com o valor final determinado para cada posição no estaqueamento, é possível calcular a largura média de contribuição de talude para as sarjetas a serem projetadas.

A2) Determinar os parâmetros Área Molhada, Perímetro Molhado e Raio Hidráulico de cada sarjeta do álbum de projetos do DNIT, a partir das dimensões previamente definidas para cada elemento deste álbum.

A3) Determinar o comprimento crítico para cada uma das sarjetas, a partir dos parâmetros calculados anteriormente e dos valores estabelecidos por Pinheiro (2021) para as declividades da rodovia, larguras da faixa de tráfego e de acostamento, além dos coeficientes de rugosidade de Manning característicos para sarjetas em concreto ou grama (n=0,016 e n=0,030, respectivamente) e do coeficiente de escoamento superficial da pista para um revestimento betuminoso (C=0,95). Deve-se levar em conta que o comprimento crítico será diferente para trechos retos e para trechos em curva, devido ao fato de que as curvas possuem superlargura e, portanto, um acréscimo na largura da faixa de tráfego de 0,30m para cada lado da pista de rolamento.

A4) Comparar o comprimento crítico encontrado e o comprimento do trecho em corte ou aterro de cada borda da rodovia, para que assim seja possível definir qual sarjeta e/ou valeta-tipo suporta e qual não suporta a vazão solicitante.

A5) Realizar o cálculo da velocidade de escoamento para cada seção-tipo das sarjetas do álbum de projetos do DNIT, estabelecendo como velocidade limite de 1,80m/s para cobertura em grama e de 4,50m/s para cobertura em concreto de cimento Portland.

- **Escolha do projeto de drenagem econômico;**

B1) Indicar quais seções-tipo atendem à vazão solicitante em cada trecho da rodovia sem ultrapassar a velocidade máxima permitida para o material da sarjeta e, de posse disso, escolher a seção mais econômica que atenda tecnicamente ao projeto.

B2) Determinar o gráfico Declividade x Comprimento Crítico para os trechos em tangente e em curva, tanto para situações de corte quanto para situações de aterro.

B3) Determinar a vazão real em cada trecho de sarjeta para as duas bordas da rodovia.

O dimensionamento das valetas segue os mesmos passos de A2 até B3 (à exceção de B2), com modificações em relação ao valor do coeficiente de escoamento (em que passa a ser utilizado C = 0,20), na determinação da área de contribuição para cada elemento e na comparação do comprimento crítico com o comprimento do trecho (passa a ser comparada diretamente a vazão suportada pela valeta com a vazão solicitante nela).

- **Dimensionamento dos elementos de drenagem de 2ª linha, ou seja, dimensionamento dos bueiros e descidas d'água;**

C1) Indicar a posição das descidas d'água no terreno para, com isso, determinar quais sarjetas e valetas contribuem para a vazão solicitante total absorvida pelo elemento.

C2) Determinar a descida d'água ideal a partir da vazão suportada pelos elementos padrões do álbum do DNIT.

C3) Determinar a posição dos bueiros de greide para, com isso, indicar quais os elementos de contribuição (descidas d'água, sarjetas e/ou valetas) que conduzem água para estes bueiros.

C4) Determinar uma seção-tipo inicial e uma declividade para o bueiro. De posse disso, calcular a vazão suportada pelo bueiro a partir da fórmula de Manning, considerando as dimensões da seção-tipo escolhida para o cálculo dos parâmetros: Área Molhada, Perímetro Molhado e Raio Hidráulico.

C5) Realizar o cálculo da velocidade de escoamento no bueiro, respeitando o valor limite de velocidade para o material do mesmo.

C6) Realizar uma estimativa inicial do diâmetro (para o caso de bueiros tubulares), e calcular Área Molhada e Raio Hidráulico a partir das relações fornecidas na tabela de tubos circulares parcialmente cheios.

C7) Calcular a vazão máxima suportada a partir da fórmula de Manning e comparar com a maior vazão de contribuição incidindo sobre um bueiro

C8) Verificar a velocidade de escoamento para aquela seção-tipo e, em caso de aceitação do valor, comparar com os custos de execução do outro tipo de bueiro calculado, escolhendo assim o elemento mais econômico para drenagem local.

- **Desenhos em CAD do projeto.**

D1) Realizar a representação geral da drenagem projetada para a rodovia, indicando o tipo de sarjeta e de valeta em cada trecho, o sentido de encaminhamento da água ao longo da pista e os pontos divisor e coletor de águas, além da posição dos bueiros de greide e das descidas d’água.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo aborda a apresentação e discussão dos resultados encontrados, detalhando todos os cálculos realizados, debatendo e confrontando, quando possível, com os resultados apresentados no projeto de drenagem da duplicação da BR-316 e demais estudos citados na revisão bibliográfica.

4.1. Definição das Larguras dos Taludes de Contribuição (Etapa A1)

Com base no projeto geométrico de Pinheiro (2021), foram utilizados os valores de cotas do terreno e de projeto para determinação de quais pontos do estaqueamento estão em corte e quais estão em aterro.

Para talude em corte, foi considerado que não existia a possibilidade de escorregamento ou desmoronamento do terreno. Diante disso, foi utilizada a relação V:H = 3:2, o que significa dizer que a cada 2m de avanço no plano horizontal teremos 3m no plano vertical. Já para os casos de talude em aterro, deve-se considerar que a inclinação deste depende da altura do aterro e da natureza do terreno. Como alguns pontos de estaqueamento possuem aterros com mais de 3m de altura, utiliza-se a relação V:H = 2:3.

Dessa forma, assume-se as Equações 19 e 20 para determinação das larguras de contribuição de corte e aterro para cada borda da rodovia:

$$LBE = \frac{Bgreide - Bterreno}{\frac{2}{3} - (\frac{Eterreno - Bterreno}{meia\ plataforma})} \tag{19}$$

$$LBD = \frac{Bgreide - Bterreno}{\frac{2}{3} - (\frac{Bterreno - Eterreno}{meia\ plataforma})} \tag{20}$$

Em que:

LBE = Largura da borda esquerda da rodovia.

LBD = Largura da borda direita da rodovia.

B_{greide} = Cota da borda do greide projetado.

$B_{terreno}$ = Cota da borda do terreno natural.

$E_{terreno}$ = Cota do eixo do terreno natural.

Meia plataforma = Valor da metade da largura da plataforma da rodovia.

Os valores calculados estão presentes na Tabela 7, considerando apenas o intervalo da estaca 0 à estaca 10 como amostragem. A Tabela completa encontra-se no Apêndice B.

Tabela 7 - Largura dos Taludes de Contribuição

LARGURA DOS TALUDES DE CONTRIBUIÇÃO				
Estaca	*L Ate e (m)*	*L Corte e (m)*	*L Ate d (m)*	*L Corte d (m)*
0	3,85		1,19	
1		0,47		1,10
2		1,64		2,11
3		1,71		2,23
4		1,74		2,13
5		1,63		2,02
6		1,51		1,94
7		1,37		2,00
8		1,28		2,10
9		1,66		2,26
10		1,41		2,08

Em que:

Ate = Aterro;

e = Lado esquerdo no sentido do estaqueamento;

d = Lado direito no sentido do estaqueamento.

4.2. Determinação dos Parâmetros Am, Pm e Rh das Sarjetas (Etapa A2)

Visando o cálculo da vazão suportada por cada tipo de sarjeta, foram determinados os 3 parâmetros fundamentais para aplicação na fórmula de Manning, levando em consideração a dimensão padrão de cada elemento segundo o álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem do DNIT.

É importante ressaltar que a geometria da sarjeta influencia na equação utilizada para determinação da área molhada e do perímetro molhado. Como os elementos possuem geometria triangular e trapezoidal, utiliza-se a equação padrão de cálculo de área de um triângulo e de um trapézio. Já para calcular o perímetro molhado, basta somar as dimensões da base da sarjeta com as suas paredes laterais. Dessa forma, foram encontrados os valores presentes na Tabela 8.

Tabela 8 - Am, Pm e Rh das Sarjetas

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	Am (m²)	Pm (m)	Rh (m)
STC-01	0,1563	1,3843	0,1129
STC-02	0,1500	1,1858	0,1265
STC-03	0,1200	1,0074	0,1191
STC-04	0,0700	0,8214	0,0852
STC-05	0,1350	1,2933	0,1044
STC-06	0,1170	1,0721	0,1091
STC-07	0,0870	0,8936	0,0974
STC-08	0,0550	0,7447	0,0739
STG-01	0,1563	1,3843	0,1129
STG-02	0,1500	1,1858	0,1265
STG-03	0,1200	1,0074	0,1191
STG-04	0,0700	0,8214	0,0852
SZC-01	0,1800	1,1485	0,1567
SZC-02	0,0800	0,7657	0,1045
SZG-01	0,1800	1,1485	0,1567
SZG-02	0,0800	0,7657	0,1045

4.3. Determinação do Comprimento Crítico das Sarjetas (Etapas A3 e A4)

Para a determinação do comprimento crítico, é necessário que seja feita a comparação entre a vazão de contribuição e a capacidade de vazão da sarjeta. Para isso, é importante que se conheça todos os valores que serão utilizados na aplicação da Equação 6.

Os valores de Am e Rh para cada elemento já foram determinados no item anterior. Já as declividades longitudinais estão presentes na Tabela 6 e dependem da posição na rodovia em que se considera a construção da sarjeta.

Para determinação do valor de n, deve-se levar em consideração o material do qual é feito o elemento. Por se tratar de sarjetas de concreto e de grama, utiliza-se n = 0,016 e n = 0,030, respectivamente.

O valor do coeficiente de escoamento superficial adotado para regiões em aterro será de C=0,95 em virtude do revestimento betuminoso que compõe a pista de rolamento. Para sarjetas em região de corte, será feita uma média ponderada dos coeficientes característicos para revestimento betuminoso (presente na pista) e para talude gramado no terreno natural, adotando para isso os valores presentes na Tabela 9.

Tabela 9 - Coeficientes Característicos Para Cada Superfície

Características da superfície	Coeficiente de escoamento
Revestimento de concreto de cimento portland	0,70 – 0,90
Revestimento betuminoso	0,80 – 0,95
Revestimento primário	0,40 – 0,60
Solos sem revestimento com baixa permeabilidade	0,40 – 0,65
Solos sem revestimento com permeabilidade moderada	0,10 – 0,30
Taludes gramados	0,50 – 0,70
Prados e campinas	0,10 – 0,40
Áreas florestais	0,10 – 0,25
Terrenos cultivados em zonas altas	0,15 – 0,40
Terrenos cultivados em vales	0,10 – 0,30

Fonte: Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006)

O valor adotado para revestimento betuminoso será C1 = 0,95, enquanto que para o talude gramado será C2 = 0,65. De posse desses valores e das larguras de

contribuição de cada superfície, será aplicada a Equação 2 para determinar o coeficiente de escoamento ponderado. Em razão da existência de trechos em tangente e trechos curvos, o valor do coeficiente ponderado não terá um único valor.

O valor de L será dado pela largura da meia plataforma nos trechos em tangente e por toda a plataforma contribuinte para a sarjeta na borda interna das curvas. Para o primeiro caso (trechos retos), esse valor é encontrado a partir da soma das larguras da faixa de tráfego, do acostamento e da “boca” do elemento de drenagem. Já para os trechos em curva, inclui-se nesse somatório a largura da outra faixa de tráfego e o valor da superlargura.

É importante mencionar que, para sarjetas presentes em áreas de corte, foi incluído nesse somatório o valor de 1,89m, correspondente à largura média da projeção horizontal dos taludes de corte.

A chuva de projeto é de 223,52 mm/h, valor obtido a partir da Equação 3.

Com base nas considerações feitas e nos valores abordados, utilizou-se a Equação 6 para obter os comprimentos críticos presentes nas Tabelas 10, 11, 12 e 13.

A nomenclatura “STC” se refere às sarjetas triangulares de concreto, enquanto que “STG” é referente às sarjetas triangulares de grama.

Tabela 10 - Comprimento Crítico das Sarjetas de Aterro Para Trecho Reto

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	Dcrít (m)		
	2,40%	4,00%	6,00%
STC-01	**914,55**	**1180,68**	**1446,03**
STC-02	**984,85**	**1271,43**	**1557,18**
STC-03	**781,79**	**1009,29**	**1236,12**
STC-04	**370,88**	**478,80**	**586,41**
STC-05	**770,05**	**994,13**	**1217,56**
STC-06	**721,39**	**931,31**	**1140,61**
STC-07	**514,01**	**663,59**	**812,73**
STC-08	**271,67**	**350,73**	**429,55**
STG-01	**487,76**	**629,70**	**771,22**
STG-02	**525,25**	**678,10**	**830,50**
STG-03	**416,96**	**538,29**	**659,27**
STG-04	**197,80**	**255,36**	**312,75**
SZC-01	**1321,36**	**1705,87**	**2089,26**
SZC-02	**477,56**	**616,53**	**755,09**
SZG-01	**704,73**	**909,80**	**1114,27**
SZG-02	**254,70**	**328,82**	**402,71**

Tabela 11 - Comprimento Crítico das Sarjetas de Aterro Para Trecho em Curva

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	Dcrít (m)	
	4,00%	6,00%
STC-01	**740,04**	**906,36**
STC-02	**785,30**	**961,79**
STC-03	**615,67**	**754,03**
STC-04	**290,18**	**355,40**
STC-05	**616,98**	**755,64**
STC-06	**567,37**	**694,88**
STC-07	**398,97**	**488,63**
STC-08	**210,44**	**257,73**
STG-01	**394,69**	**483,39**
STG-02	**418,83**	**512,95**
STG-03	**328,36**	**402,15**
STG-04	**154,76**	**189,55**
SZC-01	**1066,17**	**1305,79**
SZC-02	**376,08**	**460,60**
SZG-01	**568,62**	**696,42**
SZG-02	**200,58**	**245,66**

Tabela 12 - Comprimento Crítico das Sarjetas de Corte Para Trecho Reto

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	Dcrít (m)		
	2,40%	4,00%	6,00%
STC-01	**763,76**	**986,01**	**1207,61**
STC-02	**817,12**	**1054,90**	**1291,98**
STC-03	**645,05**	**832,75**	**1019,91**
STC-04	**305,12**	**393,91**	**482,43**
STC-05	**640,27**	**826,59**	**1012,36**
STC-06	**594,87**	**767,97**	**940,56**
STC-07	**421,35**	**543,96**	**666,21**
STC-08	**222,49**	**287,23**	**351,79**
STG-01	**407,34**	**525,87**	**644,06**
STG-02	**435,80**	**562,61**	**689,06**
STG-03	**344,02**	**444,13**	**543,95**
STG-04	**162,73**	**210,08**	**257,30**
SZC-01	**1102,10**	**1422,81**	**1742,58**
SZC-02	**394,03**	**508,69**	**623,01**
SZG-01	**587,79**	**758,83**	**929,37**
SZG-02	**210,15**	**271,30**	**332,27**

Tabela 13 - Comprimento Crítico das Sarjetas de Corte Para Trecho em Curva

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	Dcrít (m)	
	4,00%	6,00%
STC-01	**658,55**	**806,56**
STC-02	**696,94**	**853,57**
STC-03	**545,17**	**667,69**
STC-04	**256,66**	**314,34**
STC-05	**548,04**	**671,21**
STC-06	**502,29**	**615,17**
STC-07	**352,38**	**431,57**
STC-08	**185,80**	**227,55**
STG-01	**351,23**	**430,16**
STG-02	**371,70**	**455,24**
STG-03	**290,76**	**356,10**
STG-04	**136,88**	**167,65**
SZC-01	**948,26**	**1161,38**
SZC-02	**333,02**	**407,86**
SZG-01	**505,74**	**619,40**
SZG-02	**177,61**	**217,53**

As células em coloração diferente contidas nas Tabelas 10, 11, 12 e 13 representam as seções-tipo que não atingiram um comprimento mínimo para evitar o transbordamento do dispositivo de drenagem e, portanto, não podem ser utilizadas no

projeto. Para chegar a essa conclusão, esses valores foram comparados com a extensão real de cada trecho em corte e em aterro da rodovia, apresentados na Tabela 14. A identificação de alguns trechos será apresentada na Figura 3 do item 4.7, enquanto que a representação completa encontra-se no Apêndice C.

Tabela 14 - Extensão Real de Cada Trecho da Rodovia

EXTENSÃO REAL DE CADA TRECHO							
Borda Esquerda				**Borda Direita**			
Trecho	I (%)	Comp (m)	Situação	Trecho	I (%)	Comp (m)	Situação
1	2,4	18	Aterro	1	2,4	10,6	Aterro
2	2,4	366,7	Corte	2	2,4	**491,25**	Corte
3	2,4	73,2	Aterro		2,4		
4	2,4	22,1	Corte		2,4		
5	2,4	145	Aterro	3	2,4	123,15	Aterro
6	4	212,8	Aterro	4	4	134,85	Aterro
7	4	126,85	Corte	5	4	220,65	Corte
8	4	**495,35**	Aterro	6	4	479,55	Aterro
9	6	188,35	Aterro	7	6	175,1	Aterro
10	6	130,7	Corte	8	6	144,9	Corte

Em que:

Comp be = Comprimento da borda esquerda da rodovia;

Comp bd = Comprimento da borda direita da rodovia.

Além disso, é preciso deixar claro que os trechos em curva só estão presentes para as inclinações de 4% e 6%, estando assim toda a extensão com declividade de 2,4% contida em trecho reto.

4.4. Cálculo da Velocidade de Escoamento das Sarjetas (Etapa A5)

Antes de ser feita a escolha da sarjeta mais adequada para o projeto, é necessário realizar o cálculo da velocidade de escoamento em cada um dos dispositivos de drenagem. Contudo, é preciso que sejam determinados inicialmente os valores limites

para essas velocidades e, para isso, é levado em consideração o material do qual a sarjeta é constituída. A partir do Manual de Drenagem do DNIT – que apresenta apenas elementos com cobertura superficial em grama e concreto - foi utilizada a Tabela 15 para estabelecimento dos valores máximos admissíveis em que fosse possível evitar a erosão do dispositivo de drenagem.

Tabela 15 - Velocidade Máxima Admissível em Cada Tipo de Material

COBERTURA SUPERFICIAL	Velocidade máxima m/s
Grama comum firmemente implantada	1,50 – 1,80
Tufos de grama com solo exposto	0,60 – 1,20
Argila	0,80 – 1,30
Argila coloidal	1,30 – 1,80
Lodo	0,35 – 0,85
Areia fina	0,30 – 0,40
Areia média	0,35 – 0,45
Cascalho fino	0,50 – 0,80
Silte	0,70 – 1,20
Alvenaria de tijolos	2,50
Concreto de cimento portiand	4,50
Aglomerados consistentes	2,00
Revestimento betuminoso	3,00 – 4,00

Fonte: Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006)

Para a realização dos cálculos, foi utilizada a equação da continuidade (Q = V x A) associada à fórmula de Manning. Assim, foram obtidos os valores contidos na Tabela 16, no qual as células marcadas em coloração diferente representam os valores que ultrapassam a velocidade máxima permitida para o elemento em questão e, portanto, o vetam como alternativa para o projeto.

Tabela 16 - Velocidade de Escoamento das Sarjetas

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	Vel Escoamento (m/s)		
	2,40%	4%	6%
STC-01	2,261	2,919	3,576
STC-02	2,440	3,150	3,858
STC-03	2,344	3,026	3,706
STC-04	1,875	2,421	2,965
STC-05	2,147	2,771	3,394
STC-06	2,211	2,855	3,496
STC-07	2,049	2,645	3,240
STC-08	1,704	2,200	2,695
STG-01	1,206	1,557	1,907
STG-02	1,301	1,680	2,057
STG-03	1,250	1,614	1,977
STG-04	1,000	1,291	1,581
SZC-01	2,815	3,634	4,450
SZC-02	2,148	2,773	3,396
SZG-01	1,501	1,938	2,373
SZG-02	1,146	1,479	1,811

4.5. Escolha da Seção-Tipo Mais Econômica (Etapa B1)

Com base na determinação dos comprimentos críticos e das velocidades de escoamento para cada tipo de sarjeta, foi possível determinar qual dispositivo poderia ser utilizado para esse trecho de rodovia. A Tabela 17 apresenta, de forma resumida, quais elementos estão de acordo com os critérios estabelecidos e quais não estão. Para isso, é utilizada a cor verde para representar os dispositivos que estão em conformidade, enquanto que a cor vermelha mostra os que estão em desconformidade.

Tabela 17 - Resumo das Sarjetas que Atendem ao Projeto

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	Dcrít				Vel esc	Pode ser usado?
	Aterro		Corte			
	Trecho Reto	Trecho em Curva	Trecho Reto	Trecho em Curva		
STC-01						SIM
STC-02						SIM
STC-03						SIM
STC-04						NÃO
STC-05						SIM
STC-06						SIM
STC-07						NÃO
STC-08						NÃO
STG-01						NÃO
STG-02						NÃO
STG-03						NÃO
STG-04						NÃO
SZC-01						SIM
SZC-02						NÃO
SZG-01						NÃO
SZG-02						NÃO

A partir do álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem do DNIT, foi possível indicar qual o dispositivo mais econômico para atender às especificações técnicas. Para isso, foi necessário comparar o consumo médio de materiais para a construção de cada sarjeta, apresentados no próprio álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem do DNIT.

Dessa forma, a comparação permite dizer que a seção-tipo mais econômica é a STC-03, com menores volumes de escavação, apiloamento manual, concreto e argamassa asfáltica, além de menor consumo de madeira por metro de sarjeta construído.

É importante ressaltar que a sarjeta trapezoidal de concreto do tipo 01 também seria uma boa opção ao se levar em conta simplesmente o consumo de materiais para execução desse dispositivo. Entretanto, por motivos de segurança e de redução do impacto para os veículos que precisarem utilizar o acostamento, evita-se utilizar sarjetas trapezoidais contíguas às faixas de tráfego como dispositivo de drenagem.

Por fim, a Tabela 18 apresenta um resumo dos comprimentos críticos calculados da STC-03, tanto para trechos em corte quanto em aterro.

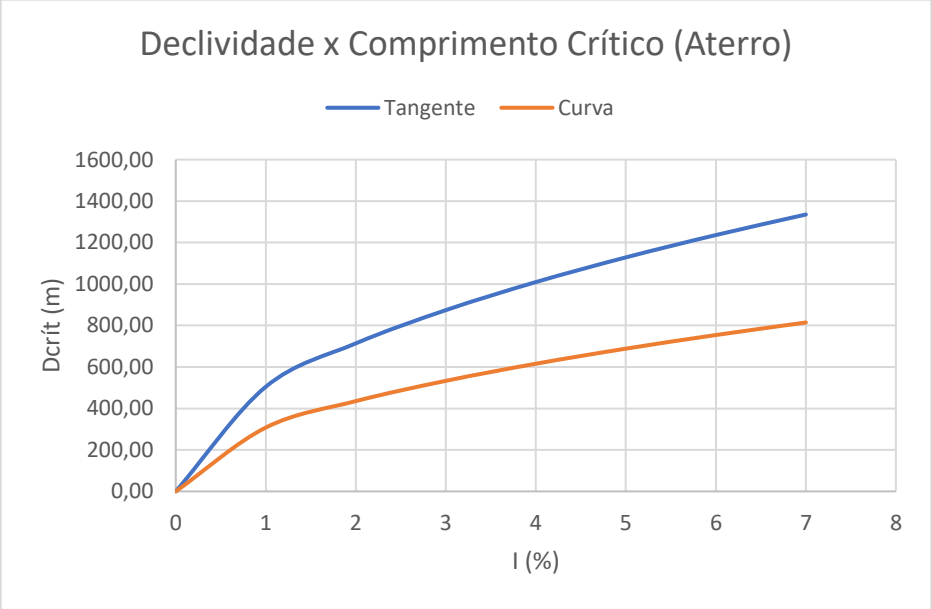
Tabela 18 - Comprimentos Criticos da STC-03

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	I (%)	Dcrít (m)			
		Aterro		Corte	
		Trecho Reto	Trecho em Curva	Trecho Reto	Trecho em Curva
STC-03	2,4	781,79		645,05	
	4,0	1009,29	615,67	832,75	545,17
	6,0	1236,12	754,03	1019,91	667,69

4.6. Gráfico Declividade x Comprimento Crítico (Etapa B2)

A partir dos resultados apresentados com o dispositivo de drenagem escolhido, foi possível realizar uma análise a respeito dos valores de comprimento crítico que podem ser alcançados de acordo com a declividade adotada. Esse estudo é demonstrado por meio do comportamento das curvas no gráfico em meio à variação de inclinação da pista. O Gráfico 1 representa essa relação para trechos em aterro.

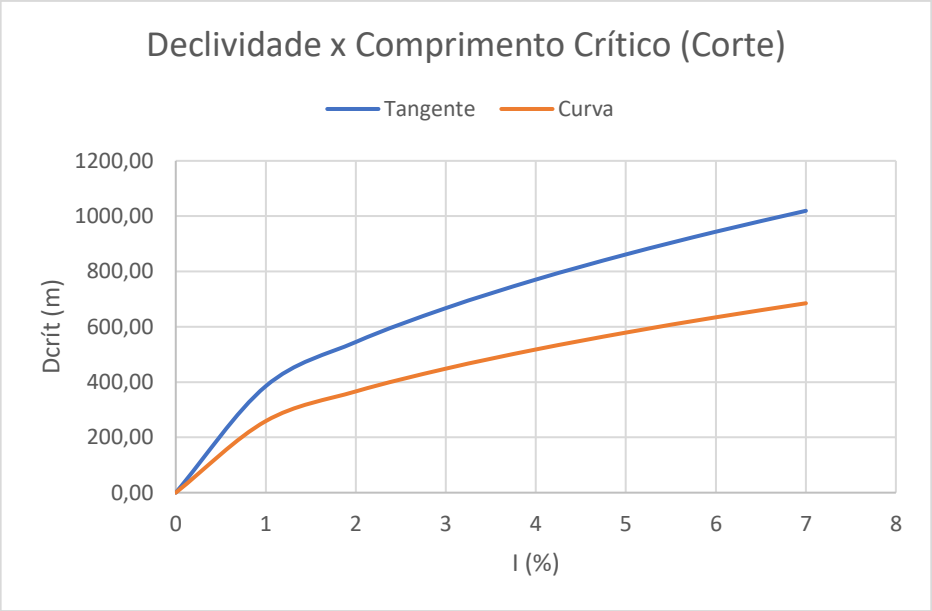
Gráfico 1 - Relação Entre Declividade e Comprimento Crítico para Trechos em Aterro



A partir do que é apresentado no gráfico, pode-se perceber que, quanto mais elevada for a declividade da rodovia, maior é o comprimento crítico. Isso é explicado pela maior velocidade com que a água é transportada, influenciando diretamente na sua vazão.

Para trechos em corte, o Gráfico 2 mostra a mesma relação entre esses parâmetros.

Gráfico 2 - Relação Entre Declividade e Comprimento Crítico para Trechos em Corte



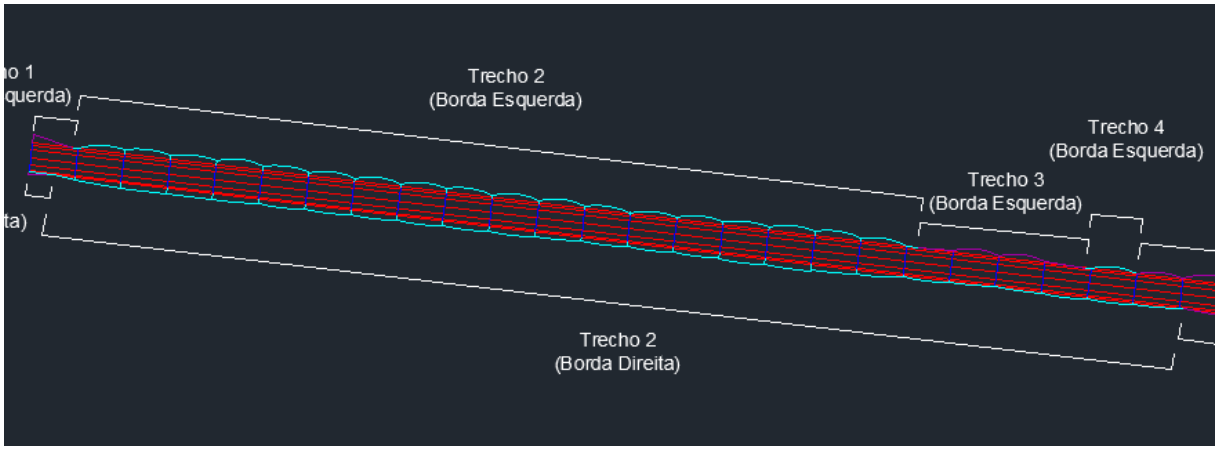
Com base no comportamento das curvas dos dois gráficos, é possível compreender que o aumento da inclinação da pista proporciona um crescimento mais acelerado do comprimento crítico para trechos em tangente com relação aos trechos em curva. Isso se deve ao fato da menor área de contribuição para esses trechos, visto que a sarjeta está em uma cota mais baixa em relação ao greide da rodovia e, assim, acumula água somente de uma faixa de tráfego e de um acostamento – além, claro, do próprio acúmulo no elemento. Para trechos curvos, essa área de contribuição é maior (duas faixas de tráfego com superlargura e um acostamento), o que proporciona um volume mais elevado de água sendo destinado à sarjeta, explicando assim o menor comprimento crítico apresentado.

4.7. Vazão Real nas Sarjetas (Etapa B3)

Com base nos resultados calculados, determina-se a vazão solicitante em cada sarjeta. Estes elementos foram divididos em trechos, no qual cada um é determinado pela mudança de corte para aterro (e vice-versa) ou mesmo pela transição de um

trecho reto para um curvo. Alguns dos trechos divididos estão representados na Figura 3. A planta completa encontra-se no Apêndice C.

Figura 3 - Trechos Adotados para a Rodovia



A partir da Equação 1 e do desmembramento da área (A) para largura e comprimento (L e d, respectivamente), foi possível calcular o valor dessa vazão real, conforme mostram as Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Vazão Real Para as Sarjetas da Borda Direita

VAZÃO REAL (BORDA DIREITA DA RODOVIA)			
	Situação	Trecho	Q1 (m^3/s)
Trecho 1	Aterro	Reto	0,004
Trecho 2	Corte	Reto	0,269
Trecho 3	Aterro	Reto	0,044
Trecho 4	Aterro	Reto	0,049
Trecho 5	Corte	Reto	0,121
Trecho 6	Aterro	Reto	0,086
	Aterro	Curva	0,142
Trecho 7	Aterro	Curva	0,103
Trecho 8	Corte	Curva	0,067
	Corte	Reto	0,032

Tabela 20 - Vazão Real Para as Sarjetas da Borda Esquerda

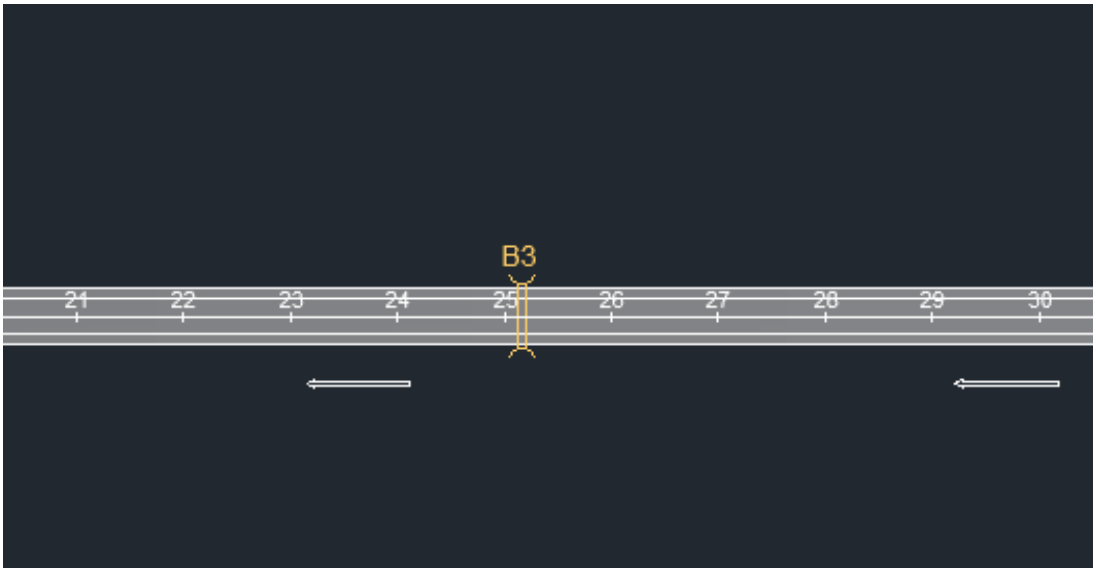
VAZÃO REAL (BORDA ESQUERDA DA RODOVIA)			
	Situação	Trecho	Q1 (m^3/s)
Trecho 1	Aterro	Reto	0,006
Trecho 2	Corte	Reto	0,201
Trecho 3	Aterro	Reto	0,026
Trecho 4	Corte	Reto	0,012
Trecho 5	Aterro	Reto	0,052
Trecho 6	Aterro	Reto	0,100
Trecho 7	Corte	Reto	0,055
Trecho 8	Aterro	Reto	0,096
	Aterro	Curva	0,160
Trecho 9	Aterro	Curva	0,132
Trecho 10	Corte	Curva	0,056
	Corte	Reto	0,072

De posse dos valores calculados, pôde-se perceber que existem trechos nos quais as sarjetas são mais solicitadas que em outros. Isso se explica por dois motivos: largura de contribuição e extensão do trecho. Ambas são determinadas por concepções do projeto geométrico, haja vista que as larguras de faixa de tráfego, acostamento e superlargura são estabelecidas pelo projetista, além de que a indicação das cotas da rodovia a ser construída influencia na determinação da quantidade e comprimento de trechos em corte e em aterro.

Com o auxílio da Tabela 14, é possível perceber que os trechos com maior extensão (trecho 2 de cada borda da rodovia) são os que possuem maior vazão de solicitação, evidenciando a necessidade de um maior número de dispositivos de drenagem de 2ª linha para conduzir a um desague seguro as águas que se acumulam nestas sarjetas. Com base nisso, foi estabelecida a instalação de 3 bueiros de greide para esse trecho (que serão dimensionados mais a frente), representados pelas siglas B1, B2 e B3 nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - Posição dos Bueiros B1 e B2

Figura 5 - Posição do Bueiro B3



4.8. Dimensionamento das Valetas

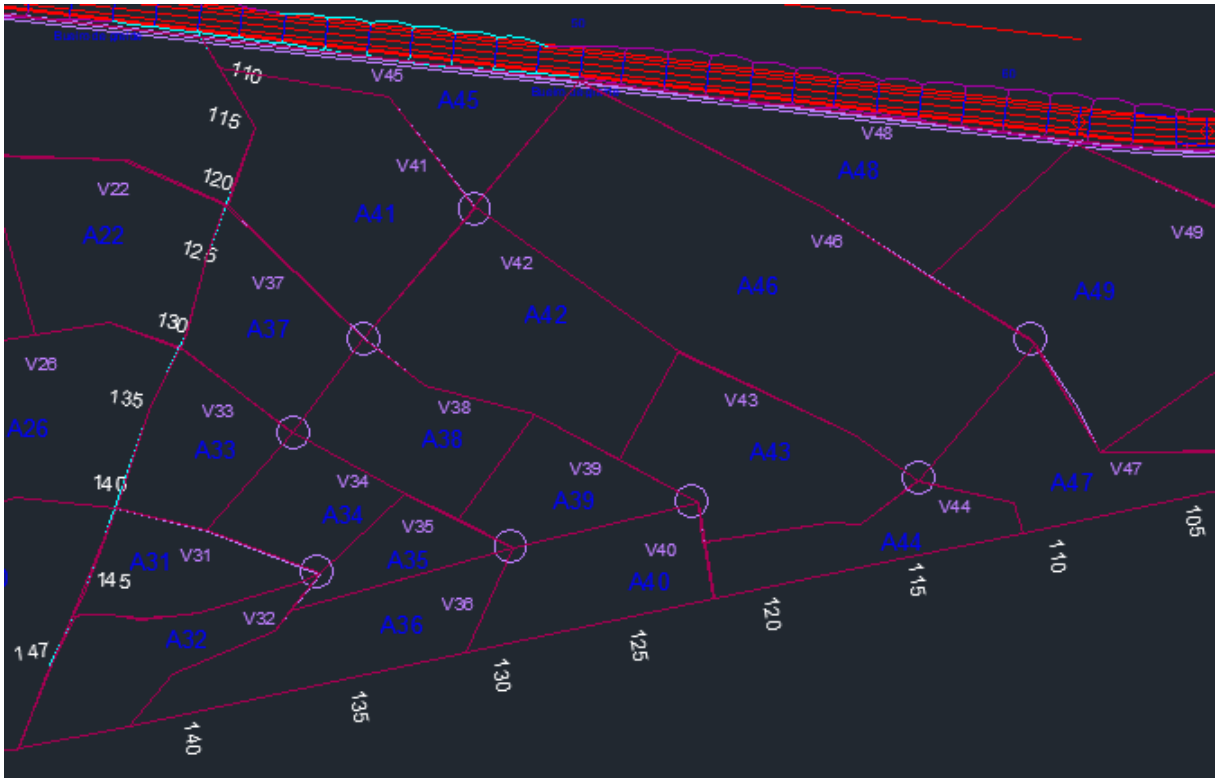
De acordo com as fórmulas geométricas básicas para cálculo de área e perímetro, foram determinados os parâmetros Área molhada, Perímetro molhado e Raio hidráulico das valetas presentes no álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem do DNIT, apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Am, Pm e Rh das Valetas

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	Am (m²)	Pm (m)	Rh (m)
VPC-01	0,3900	1,8485	0,2110
VPC-02	0,2700	1,4485	0,1864
VPC-03	0,3429	1,7637	0,1944
VPC-04	0,2349	1,3637	0,1723
VPA-01	0,3900	1,8485	0,2110
VPA-02	0,2700	1,4485	0,1864
VPA-03	0,3429	1,7637	0,1944
VPA-04	0,2349	1,3637	0,1723

O dimensionamento das valetas segue o mesmo raciocínio das sarjetas, com algumas modificações pontuais. Em primeiro lugar, foi necessário definir a posição de cada valeta ao longo do terreno na borda direita da rodovia (por conta das cotas deste lado serem mais altas em relação à via). Além disso, é importante levar em consideração o cuidado com a definição de início e fim das valetas, pois elementos que atravessam muitas curvas de nível do terreno podem apresentar inclinações elevadas. Após essa definição, foram criadas 58 valetas ao longo da borda em questão, sendo parte delas representadas pela Figura 6 (juntamente com suas respectivas áreas de contribuição). A camada do CAD com as curvas de nível foi apagada para deixar a Figura 6 mais compreensível.

Figura 6 - Valetas Adotadas ao Longo da Borda Direita da Rodovia



A partir do posicionamento das valetas, foi possível determinar a declividade, com base na diferença de cotas e no comprimento de cada elemento. Além disso, a definição da área de contribuição foi realizada no próprio AutoCad, com base na interpretação do encaminhamento dado por cada curva de nível.

Um ponto observado foi que, para um coeficiente de escoamento de C=0,35, valetas com área acima de 20.000m² apresentavam vazão de contribuição acima da vazão suportada por algumas seções-tipo. Já para um coeficiente C=0,20 (valor adotado para o dimensionamento), áreas acima de 30.000m² não atendiam ao solicitado por meio da vazão suportada pelo dispositivo.

Assim, utilizando C=0,20 e adotando a mesma vazão de projeto calculada anteriormente (i=223,52mm/h), foi possível definir a vazão solicitante em cada valeta. A Tabela 22 apresenta estes valores, considerando apenas uma amostra das 20 valetas iniciais. A Tabela completa encontra-se no Apêndice D.

Tabela 22 - Cálculo da Vazão Solicitante na Valeta

VALETA	TIPO	ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (m²)	Q1 (m³/s)
V1	VPA	2079,50	0,03
V2	VPC	18156,70	0,23
V3	VPC	11265,46	0,14
V4	VPC	11456,45	0,14
V5	VPC	2624,39	0,03
V6	VPC	5400,95	0,07
V7	VPC	11076,35	0,14
V8	VPC	4470,31	0,06
V9	VPC	3018,79	0,04
V10	VPC	4542,04	0,06
V11	VPC	4606,88	0,06
V12	VPC	4708,87	0,06
V13	VPC	6032,49	0,07
V14	VPC	9972,32	0,12
V15	VPA	3792,82	0,05
V16	VPC	17627,51	0,22
V17	VPC	8099,13	0,10
V18	**VPA**/VPC	18688,40	0,23
V19	VPC	31010,47	0,39
V20	VPC	8186,99	0,10

O valor indicado pela célula em cinza representa a maior vazão de contribuição para uma única valeta. É importante entender que, quanto maior a área de contribuição do elemento, maior também será a vazão destinada a ele.

Com base nos parâmetros calculados na Tabela 21 e nas declividades determinadas para cada elemento, tornou-se possível - por meio da equação de Manning - determinar a vazão suportada por cada dispositivo de drenagem. A Tabela 23 indica os valores obtidos após os cálculos - ainda para uma amostra das 20 valetas iniciais. A Tabela completa encontra-se no Apêndice D (complementando os dados da Tabela 22).

Tabela 23 - Vazão Suportada por Cada Valeta

VALETA	DECLIVIDADE (m/m)	Q2 (m³/s)			
		VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04
V1	0,132	1,67	1,07	2,61	1,65
V2	0,042	0,94	0,60	1,47	0,93
V3	0,029	0,78	0,50	1,22	0,77
V4	0,009	0,43	0,27	0,67	0,42
V5	0,022	0,68	0,43	1,06	0,67
V6	0,022	0,69	0,44	1,08	0,68
V7	0,016	0,57	0,37	0,90	0,57
V8	0,015	0,57	0,36	0,89	0,56
V9	0,008	0,42	0,27	0,66	0,42
V10	0,012	0,51	0,32	0,79	0,50
V11	0,034	0,85	0,54	1,32	0,83
V12	0,019	0,64	0,41	0,99	0,63
V13	0,008	0,41	0,26	0,63	0,40
V14	0,002	0,20	0,13	0,31	0,19
V15	0,012	0,50	0,32	0,79	0,50
V16	0,014	0,54	0,35	0,85	0,54
V17	0,011	0,47	0,30	0,74	0,47
V18	0,009	0,44	0,28	0,68	0,43
V19	0,011	0,49	0,31	0,77	0,48
V20	0,007	0,40	0,25	0,62	0,39

Pode-se perceber que, dentre os valores calculados, existe um que apresentou uma inclinação bem acentuada, destacado pela célula em vermelho. Considerando que a declividade padrão para esses elementos geralmente fica na faixa de 1% a 7%, esse valor representa um indício de que a velocidade da água nesse dispositivo pode ser bem elevada, causando problemas de erosão local.

Por outro lado, a célula em coloração rosa indica uma valeta que apresentou vazão suportada abaixo da vazão de contribuição. Com base nisso, esse dispositivo seria desconsiderado para escolha como elemento de drenagem.

Em alguns casos, apesar da vazão suportada pelo elemento ser suficiente, a velocidade de escoamento se mostrou acima do permitido para o material da valeta (concreto ou grama). Isso pode ser explicado pela forte inclinação do elemento, já que alguns apresentaram uma alta diferença de cota para um comprimento pequeno de valeta, o que necessariamente leva a declividades elevadas. A Tabela 24 mostra as

valetas que apresentaram velocidade de escoamento acima do permitido, segundo a tabela 31 do Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT. A velocidade calculada para todas as valetas encontra-se no Apêndice D (complementando os dados das Tabelas 22 e 23).

Tabela 24 - Valetas com Velocidade Incompatível

VALETA	V (m/s)			
	VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04
V1	4,29	3,95	7,62	7,03
V2	2,41	2,22	4,28	3,95
V3	2,00	1,84	3,55	3,27
V11	2,17	2,00	3,85	3,55
V22	1,82	1,68	3,24	2,99
V26	1,85	1,70	3,29	3,03
V30	2,20	2,03	3,91	3,61
V32	1,89	1,74	3,35	3,09
V45	2,26	2,08	4,01	3,70
V48	2,47	2,27	4,38	4,04
V51	2,53	2,33	4,50	4,15
V52	3,10	2,85	5,50	5,08
V55	4,72	4,34	8,37	7,73
V58	2,40	2,21	4,26	3,93

É importante frisar que os resultados apresentados consideram o dispositivo de drenagem na iminência de transbordamento. Entretanto, a vazão de contribuição pode mostrar que a situação na valeta seja diferente. Para isso, foi necessário realizar uma limitação no valor do raio hidráulico, igualando-o à velocidade máxima admissível para o concreto ou para a grama, a depender do material do elemento.

Assim, foi aplicado um teste de hipóteses para determinar a altura de lâmina d'água que alcance com mais proximidade o raio hidráulico limite calculado para cada valeta. A Tabela 25 apresenta os resultados dos cálculos descritos.

Tabela 25 - Cálculo da Altura de Lâmina D'Água

VALETA	Rh limite (p/ Vmáx=1,8m/s)	Rh limite (p/ Vmáx=4,5m/s)	h(lâmina d'água)			
			VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04
V1	0,05728	0,08818	0,04	0,04	0,06	0,06
V2	0,13593		0,20	0,20		
V3	0,18024		0,25	0,29		
V11	0,15957		0,21	0,24		
V22	0,20703		0,29			
V26	0,20221		0,28			
V30	0,15590		0,20	0,24		
V32	0,19679		0,27			
V45	0,14987		0,17	0,20		
V48	0,13150		0,16	0,19		
V51	0,12645		0,17	0,18		
V52	0,09336	0,14373	0,11	0,12	0,18	0,21
V55	0,04974	0,07658	0,06	0,06	0,09	0,10
V58	0,13696		0,17	0,20		

A partir dos valores encontrados, foi possível determinar a vazão real suportada na valeta - sem exceder a velocidade limite do dispositivo - para cada altura de lâmina d’água e compará-la com a vazão de contribuição. A Tabela 26 indica os valores de vazão real calculados para cada elemento. A Tabela com as vazões solicitantes e com os dados da Tabela 25 encontram-se no Apêndice E.

Tabela 26 - Vazão Real Suportada em Cada Dispositivo

VALETA	Q2 (real)			
	VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04
V1	0,07	0,04	0,26	0,17
V2	0,44	0,29		
V3	0,55	0,46		
V11	0,46	0,37		
V22	0,68			
V26	0,66			
V30	0,44	0,36		
V32	0,63			
V45	0,19	0,15		
V48	0,20	0,15		
V51	0,21	0,15		
V52	0,16	0,11	0,70	0,55
V55	0,12	0,08	0,48	0,34
V58	0,21	0,16		

As células em coloração rosa indicam as seções-tipo que apresentaram vazão suportada abaixo da vazão de contribuição e que, portanto, foram vetadas para utilização no projeto. Considerando que apenas as valetas V1, V52 e V55 apresentaram velocidade acima do permitido para o dispositivo (como mostrado na Tabela 24), somente elas tiveram sua vazão suportada recalculada. Para os demais elementos, foram mantidos os valores calculados na Tabela 23.

A partir dos resultados obtidos, chegou-se à conclusão de que a seção-tipo que melhor atendeu às demandas foi a VPC-04 e a VPA-04. Essa análise foi realizada por meio da comparação entre os consumos médios de materiais - presentes no álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem do DNIT - da VPC-03 e VPC-04 (para corte) e da VPA-03 e VPA-04 (para aterro).

Assim como no projeto de duplicação da rodovia BR-316, foi dada preferência às valetas de concreto em detrimento das que possuem cobertura em grama para evitar o crescimento de vegetação, um problema que acomete grande parte dos dispositivos de drenagem em rodovias em virtude das faltas de manutenção e conservação periódica, como é retratado no estudo de caso de Alves (2019) para a rodovia SC-135.

4.9. Dimensionamento das Descidas D'Água (Etapas C1 e C2)

Através da interpretação das curvas de nível e da localização adotada para os bueiros de greide, é possível indicar a posição ideal para as descidas d'água no terreno. Considerando que as descidas do tipo rápido são indicadas para pequenos desníveis, a análise aqui foi feita apenas para as descidas em degraus. As Figuras 7, 8 e 9 mostram as posições adotadas para esses elementos no terreno. As siglas DCD e DAD significam, respectivamente, Descida d'água de Corte em Degraus e Descida d'água de Aterro em Degraus.

Figura 7 - Posição Adotada para as DCD 1, 2, 3 e 4

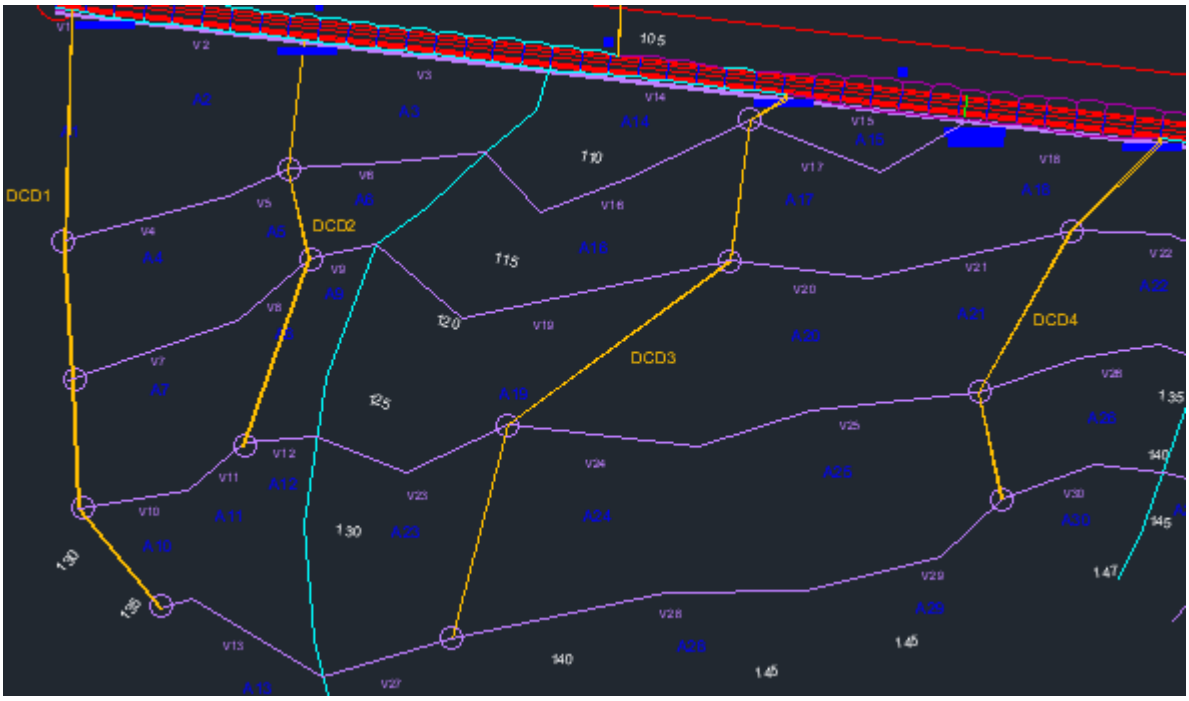


Figura 8 - Posição Adotada para as DCD 5, 6 e 7 e DAD 3 e 4.

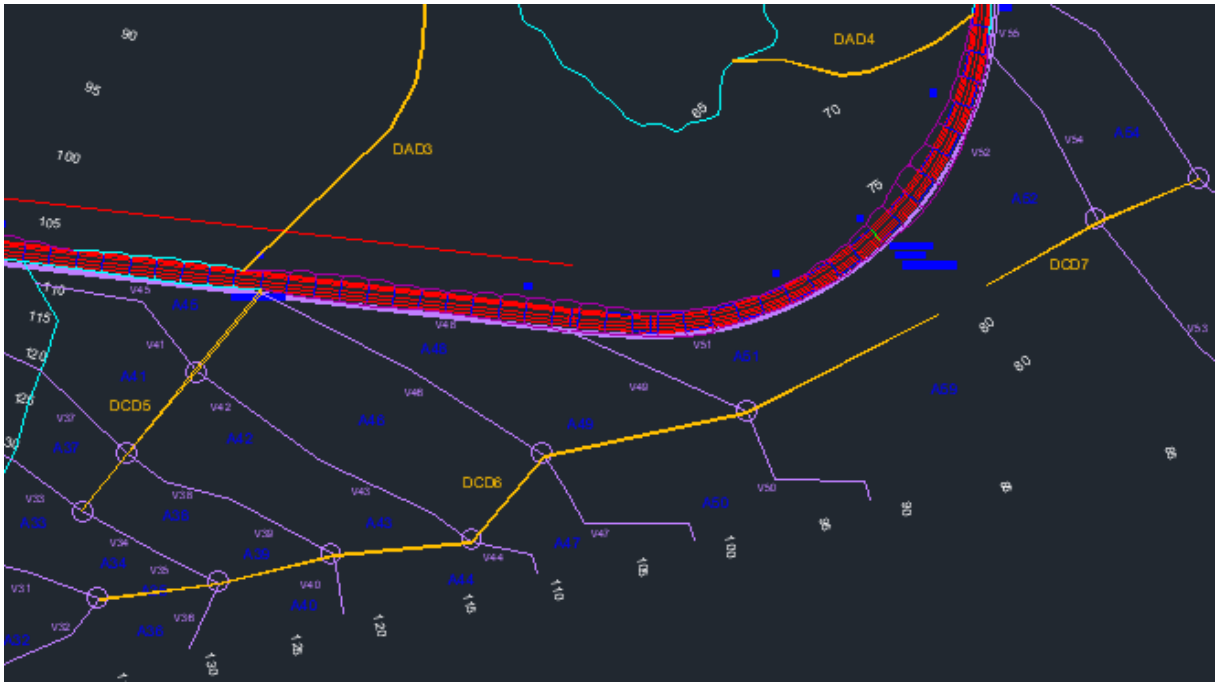
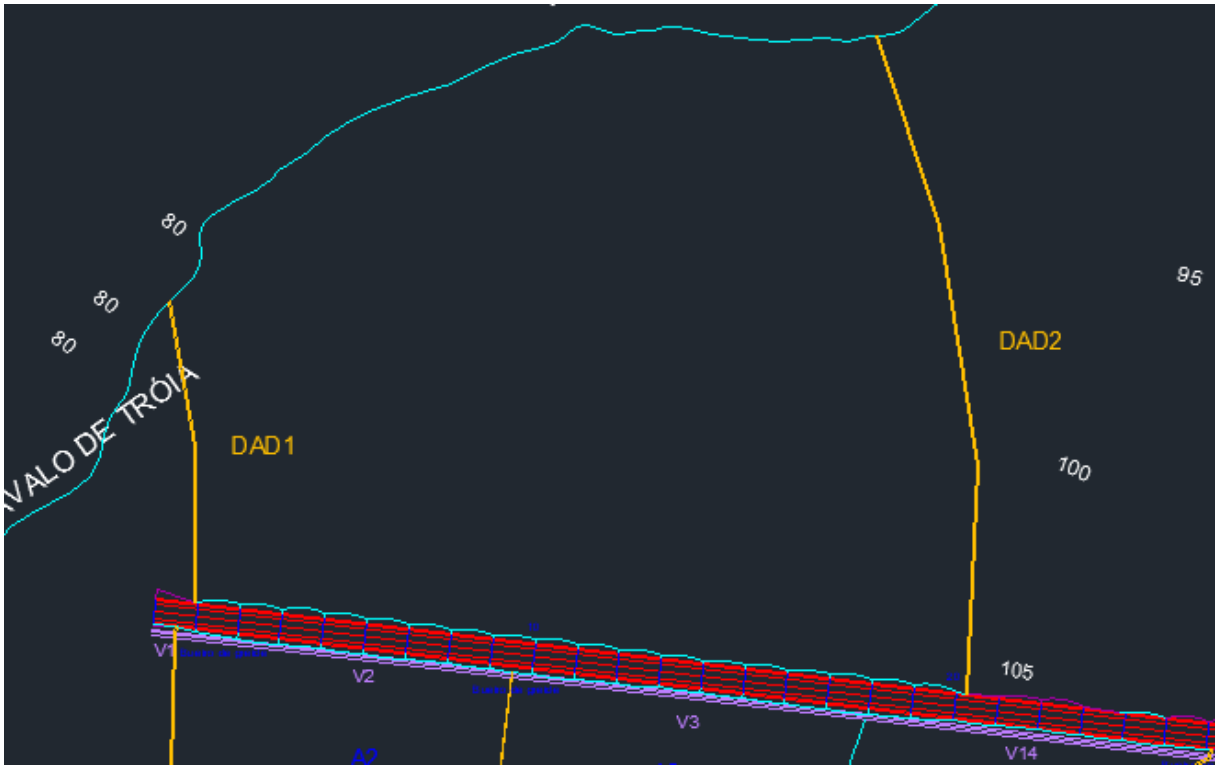


Figura 9 - Posição Adotada para as DAD 1 e 2



A partir da vazão de contribuição presente em cada valeta (Tabela 22) e das vazões reais em cada borda da rodovia (Tabelas 19 e 20), foi necessário analisar os

elementos que encaminhavam água para cada uma das descidas d'água previstas. Assim, a Tabela 27 mostra os dispositivos de contribuição para cada descida e o valor total de vazão presente nestas, além do desnível entre o ponto de início e de fim da descida. As vazões apresentadas na última coluna da Tabela representam a soma das vazões que vem de cada uma das valetas e/ou sarjetas listadas na coluna anterior.

Tabela 27 - Elementos de Contribuição para as Descidas D'Água

	DISPOSITIVO DE DRENAGEM	Desnível (m)	Valetas/Sarjetas de Contribuição	Vazão de Contribuição (m^3/s)
Borda Dir	DCD-01	40	V1;V2;V4;V7; V10; V13; S1;S2 (V2)	0,76
	DCD-02	22	V3; V5; V6; V8; V9; V11; V12; V14; S2 (V3-V14)	0,76
	DCD-03	28,5	V15; V16; V17; V19; V20; V23; V24; V27; V28; S3 (V15)	1,63
	DCD-04	27,5	V18; V21; V22; V25; V26; V29; V30; S4 (V18)	1,16
	DCD-05	29	V33; V34; V37; V38; V41; V42; V45; S5	0,60
	DCD-06	59	V31; V32; V35; V36; V39; V40; V43; V44; V46; V47; V49; V50	1,04
	DCD-07	21	V53; V54; V56; V57	1,06
Borda Esq	DAD-08	12,5	S1; S2	0,21
	DAD-09	33,8	S3;S4;S5	0,09
	DAD-10	36,8	S6;S7	0,16
	DAD-11	28	S10	0,13

Os elevados valores de desníveis apresentados justificam a escolha de uma descida d'água em degraus, haja vista que descidas do tipo rápido só são indicadas para pequenas diferenças de nível, conforme ocorre com o projeto de duplicação da BR-316, em que foram utilizadas descidas d'água do tipo rápido.

Por meio do método empírico (denominado Método I), utilizou-se e Equação 7 para a determinação da altura necessária para as paredes das descidas d'água, levando em conta que a largura escolhida foi de 0,80m (valor presente na DCD-04 do álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem do DNIT) e que a vazão a ser drenada corresponde ao maior valor presente na Tabela 27 (Q1 = 1,63m³/s). Assim, chegou-

se a H = 0,978m, permitindo assim que fosse adotada uma altura de 1,00m para as paredes das descidas d'água.

É importante destacar que o dimensionamento foi realizado para a situação mais crítica e que, por isso, foi utilizado o valor de Q1 = 1,63m³/s. Assim, poderiam ser usadas, eventualmente, alturas menores para as vazões de contribuição menores. Porém, por simplicidade e padronização, será adotado somente o dimensionamento mais crítico.

Portanto, adotou-se para o projeto as descidas do tipo DCD-04, com largura de 0,80m e altura de 1,00m.

4.10. Dimensionamento dos Bueiros de Greide (Etapas C3 a C8)

A partir da localização das passagens de corte para aterro (com exceção do bueiro B2, que se localiza no meio de um trecho de corte), foram alocados os elementos em posições que gerassem um melhor aproveitamento na coleta das águas. As Figuras 4 e 5 (apresentadas anteriormente) e as Figuras 10, 11 e 12 indicam as posições adotadas para os bueiros em relação ao estaqueamento da rodovia.

Figura 10 - Posição Adotada para os Bueiros B4 e B5

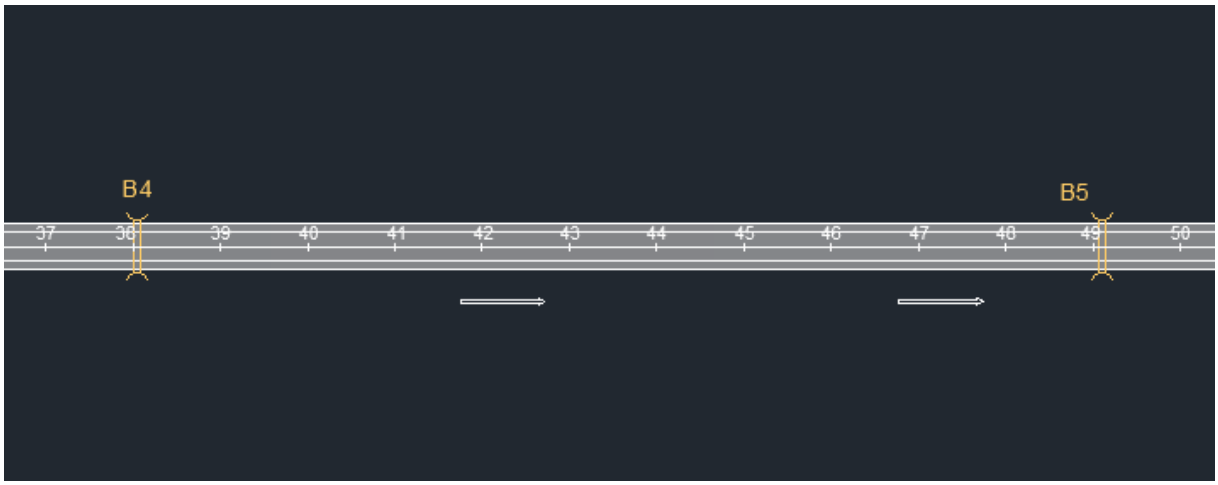
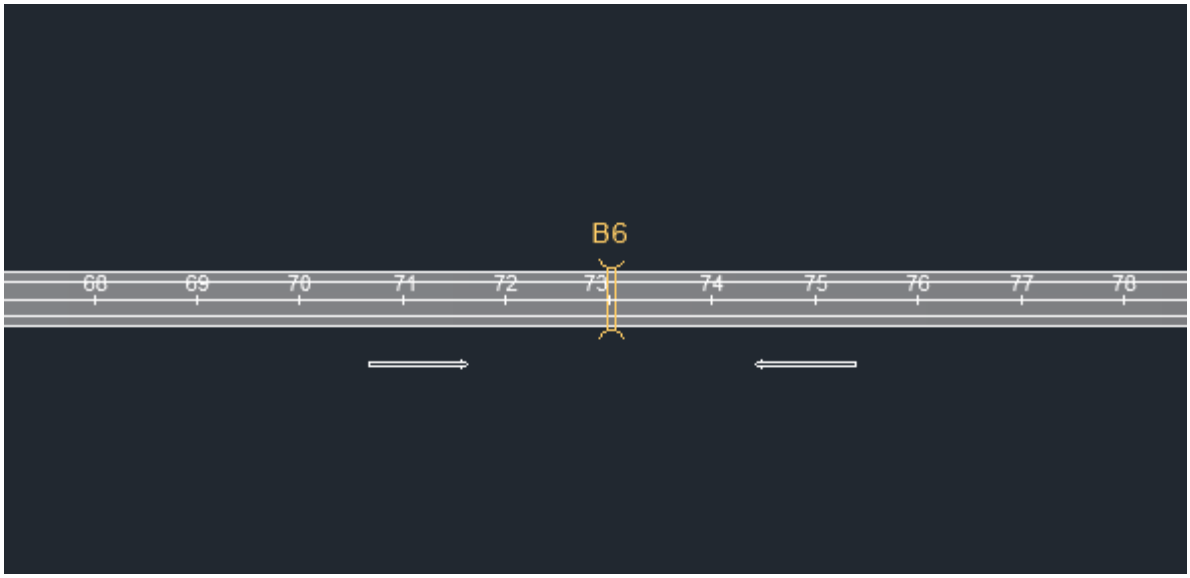


Figura 11 - Posição Adotada para o Bueiro B6



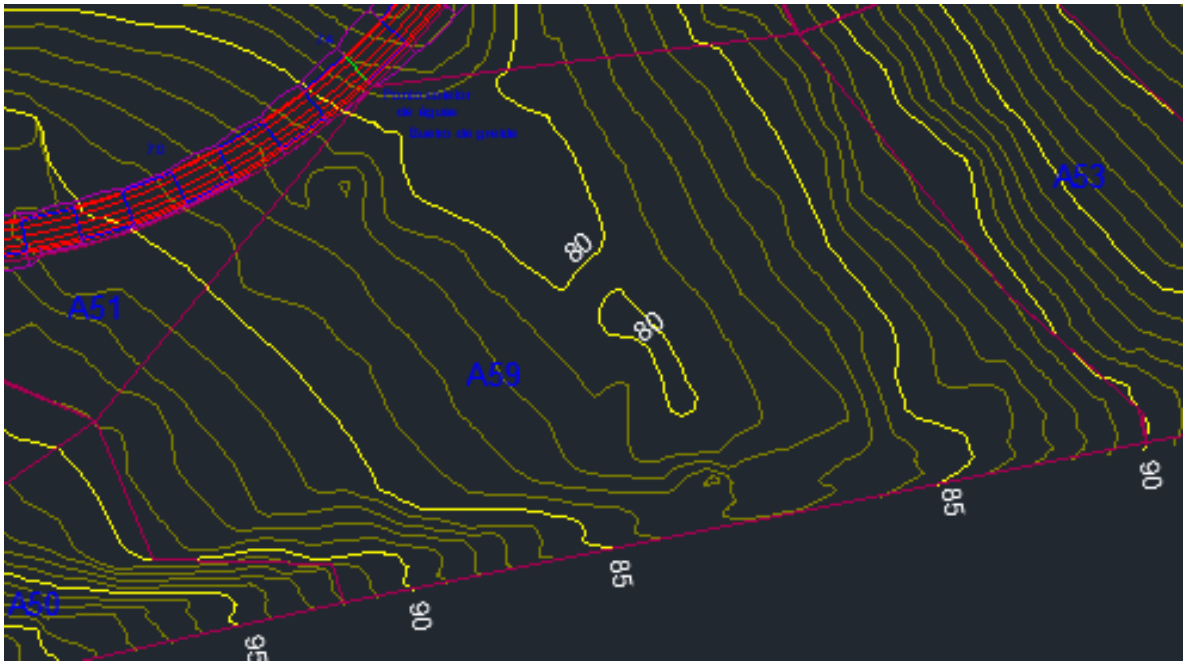
Com base nessa quantidade de bueiros adotados ao longo da rodovia, foi possível organizar, segundo a Tabela 28, os elementos de contribuição para cada bueiro e suas respectivas vazões.

Tabela 28 - Vazão de Contribuição para Cada Bueiro

Bueiro	Elemento de Contribuição	Vazão de Contribuição (m^3/s)
B1	DCD-01	0,76
B2	DCD-02	0,76
B3	DCD-03	1,63
B4	DCD-04	1,16
B5	DCD-05	0,60
B6	DCD-06/DCD-07/V51/V52/S6/S7/S8/Q_{A59}	3,37

O elemento "Q_{A59}" representa a vazão proveniente da área de número 59 no terreno, representada pela Figura 15, onde há o encontro das águas pelo encaminhamento natural do terreno, já que se trata da região com a menor cota nas proximidades da rodovia.

Figura 12 - Área de Encontro das Águas no Terreno



Assim, ao definir a área dessa região pelo próprio AutoCad e aplicando a equação do Método Racional, foi possível encontrar a vazão de Q_{A59} = 0,486 m³/s, que somada à vazão dos outros elementos que desaguam no bueiro B6, gera o valor apresentado na tabela anterior para este bueiro.

De posse das vazões solicitantes em cada bueiro, procurou-se dimensionar, como uma primeira opção, um Bueiro Simples Celular de Concreto (BSCC). Para isso, foi necessário realizar, de antemão, a verificação do regime de escoamento. Partindo das menores dimensões permitidas segundo o álbum de projetos-tipo do DNIT, utilizou-se os valores de 1,50m, tanto para a base (B), quanto para a altura (H) do bueiro.

Com base na Equação 14, foi determinado que a declividade crítica para o bueiro é de Ic = 0,68%, acima do valor estipulado de I = 0,50% para a declividade real. Isso caracteriza, portanto, um regime subcrítico.

A partir do cálculo da área molhada, raio hidráulico e da aplicação da fórmula de Manning, foi determinada a vazão suportada pelo bueiro como sendo Qs = 4,75 m³/s. Esse valor se mostrou acima da maior vazão solicitante para um único bueiro (nesse caso, o bueiro B6), que é de 3,37m³/s. Dessa forma, entende-se que o BSCC atende às vazões calculadas.

Entretanto, é necessário verificar a velocidade de escoamento no dispositivo, para que seja evitada sedimentação de partículas no fundo do bueiro - por velocidade abaixo do mínimo permitido – ou erosão das paredes do elemento em decorrência de uma velocidade acima do máximo permitido.

Após seguir os passos descritos no Apêndice F e aplicar a Equação 17, foi realizado o cálculo da velocidade de escoamento, chegando-se ao valor de V = 2,46m/s. Como esta velocidade está abaixo do máximo permitido para elementos em concreto, pode-se inferir que o dimensionamento está concluído e que, portanto, o BSCC é uma boa opção para os locais em questão.

Contudo, é importante apresentar uma alternativa para o local. Com esse objetivo, foi realizado o dimensionamento para um Bueiro Simples Tubular de Concreto (BSTC). Aplicando a relação d/D = 0,80 (recomendada pelo DNIT) como limitação de altura da lâmina d'água no bueiro, foi possível obter as relações para área molhada e raio hidráulico com o uso da tabela 18 do Manual de Drenagem de Rodovias (2006), apresentada na Tabela 29.

Tabela 29 - Relações para Condutos Circulares Parcialmente Cheios

d/D	A/D^2	R/D	K_V	K_Q
0,56	0,4526	0,2676	0,4153	0,1879
0,57	0,4625	0,2703	0,4180	0,1933
0,58	0,4724	0,2728	0,4206	0,1987
0,59	0,4822	0,2753	0,4231	0,2040
0,60	0,4920	0,2776	0,4256	0,2094
0,61	0,5018	0,2799	0,4279	0,2147
0,62	0,5115	0,2821	0,4301	0,2200
0,63	0,5212	0,2842	0,4323	0,2253
0,64	0,5308	0,2862	0,4343	0,2306
0,65	0,5404	0,2881	0,4362	0,2358
0,66	0,5499	0,2900	0,4381	0,2409
0,67	0,5594	0,2917	0,4398	0,2460
0,68	0,5687	0,2933	0,4414	0,2511
0,69	0,5780	0,2948	0,4429	0,2560
0,70	0,5872	0,2962	0,4444	0,2609
0,71	0,5964	0,2975	0,4457	0,2658
0,72	0,6054	0,2987	0,4469	0,2705
0,73	0,6143	0,2998	0,4480	0,2752
0,74	0,6231	0,3008	0,4489	0,2797
0,75	0,6319	0,3017	0,4498	0,2842
0,76	0,6405	0,3024	0,4505	0,2886
0,77	0,6489	0,3031	0,4512	0,2928
0,78	0,6573	0,3036	0,4517	0,2969
0,79	0,6655	0,3039	0,4520	0,3008
0,80	0,6736	0,3042	0,4523	0,3047
0,81	0,6815	0,3043	0,4524	0,3083

Fonte: Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006)

Além disso, a utilização da Equação 9 possibilitou determinar o valor do diâmetro teórico para o tubo (D=1,41m). Em razão de não ser um diâmetro utilizado comercialmente, o valor real adotado foi de 1,50m.

A partir do diâmetro real, foi possível determinar o regime de escoamento no bueiro a partir da Equação 11. Com base nela, chegou-se a uma declividade crítica de Ic = 0,64%, valor este acima da inclinação adotada para o bueiro (I = 0,50%). Portanto, trata-se de um regime subcrítico, o que permite que se prossiga no dimensionamento aplicando a própria fórmula de Manning – ou derivações dela, como é o caso da Equação 10.

A partir da utilização da Fórmula de Manning (Equação 4), foi possível determinar a vazão máxima suportada pelo bueiro tubular, sendo esta igual a 3,97m³/s - também superior à maior vazão solicitante nos bueiros analisados. Dessa forma, o BSTC atende no que tange à vazão, sendo necessário realizar a verificação de sua velocidade de escoamento.

Ao realizar a divisão entre vazão de projeto e vazão suportada, encontra-se o valor de Kq = 0,8489. Utilizando novamente a tabela dos condutos circulares parcialmente cheios e realizando uma interpolação entre valores próximos, encontra-se uma relação Kv = 1,1215. Aplicando este valor na Equação 12, é possível determinar que a velocidade de escoamento neste bueiro tubular é de 6,49m/s, acima da máxima velocidade permitida para um elemento em concreto. Logo, não é possível utilizá-lo como dispositivo de drenagem nesta rodovia, já que o excesso de velocidade causaria erosão nas paredes do tubo.

Analisando a equação utilizada para a determinação da velocidade de escoamento, percebe-se que só seria possível diminuir esse valor se fosse reduzido o diâmetro do tubo ou a declividade do bueiro. Entretanto, isso afetaria a vazão suportada pelo dispositivo, tornando-a menor que a vazão solicitante.

Outra alternativa seria aumentar o número de “linhas” do dispositivo, mudando de um bueiro simples para um bueiro duplo ou triplo. Contudo, essa possibilidade aumentaria o consumo de materiais, o que pode ser concluído a partir da comparação entre os quantitativos de materiais para cada tipo de bueiro, representados pelas Tabelas 30 e 31.

Tabela 30 - Consumo de Material para Bueiros Celulares

SEÇÃO L = 150		0 ≤ h ≤ 100			100 ≤ h ≤ 250			25
fck ≥ MPa		0,09	0,10	0,10	0,10	0,12	0,12	0,14
MEDIDAS	UNID.	SIMPLES	DUPLO	TRIPLO	SIMPLES	DUPLO	TRIPLO	SIMPLES
A	cm	180	345	510	180	345	510	180
B	cm	180	180	180	180	180	180	180
C	cm	210	375	540	210	375	540	210
a	cm	10	10	10	10	10	10	10
b	cm	---	30	30	---	30	30	---
d	cm	15	15	15	15	15	15	15
LASTRO	m³	0,21	0,38	0,54	0,21	0,38	0,54	0,21
FORMA	m²	8,10	12,20	16,50	8,10	12,20	16,50	8,10
CONCRETO	m³	1,01	1,79	2,57	1,01	1,79	2,57	1,01
REVESTIMENTO	m³	0,08	0,15	0,23	0,08	0,15	0,23	0,08

Fonte: Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006)

Tabela 31 - Consumo de Material para Bueiros Tubulares

Esc.	BUEIRO SIMPLES TUBULAR Φ = 150														formas m2	concreto m3	cimento saco 50kg	areia m3	brita 1 brita 2 m3	água m3	madeira m3
	a	b	c	d	e	f	g	h	k	m	n	p	L	M							
0°	240	50	260	45	75	30	30	134	10	29	39	29	260	320	20,39	6,487	31,784	4,411	4,800	1,038	0,510
5°	241			45									261		20,43	6,488	31,791	4,412	4,801	1,038	0,511
10°	244			46									264		20,53	6,492	31,810	4,414	4,804	1,039	0,513
15°	248			47									269		20,71	6,499	31,843	4,419	4,809	1,040	0,518
20°	255			48									277		20,98	6,508	31,888	4,425	4,816	1,041	0,524
25°	265			50									287		21,35	6,520	31,946	4,433	4,824	1,043	0,534
30°	277			52									300		21,86	6,534	32,015	4,443	4,835	1,045	0,547
35°	293			55									317		22,56	6,550	32,096	4,454	4,847	1,048	0,564
40°	313			59									339		23,51	6,569	32,188	4,467	4,861	1,051	0,588
45°	339			64									368		24,84	6,590	32,290	4,481	4,876	1,054	0,621

Fonte: Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006)

Para essa comparação, foi considerada uma altura de aterro de 2,00m sobre o bueiro celular e que o bueiro tubular não possui esconsidade. Porém, mesmo na existência de esconsidade, o consumo de materiais para um bueiro tubular ainda seria maior. Dessa forma, fica definido que a melhor alternativa é a utilização do Bueiro Simples Celular de Concreto (BSCC).

Deve-se ressaltar que a escolha leva em consideração apenas a quantidade de materiais a serem utilizados na construção dos bueiros. Na prática, usa-se mais o bueiro tubular do que o bueiro celular por conta da maior facilidade na obtenção de peças com essa geometria.

Importante frisar que, como não há um estudo geológico que indique dificuldade na escavação e locação dos dispositivos, a altura adotada de aterro sobre o bueiro evita qualquer limitação às dimensões deste elemento, diferentemente do que ocorreu na escolha dos bueiros apresentada por Rocha (2013), onde houveram problemas para alocar esses dispositivos em decorrência da falta de altura de recobrimento necessária.

Por fim, é necessário que existam dissipadores de energia nas saídas das descidas d'água e de bueiros, afim de reduzir a energia do fluxo d'água e, com isso, evitar que o excesso de velocidade provoque erosão do terreno ao redor. Além disso, é importante também a existência de caixas coletoras ao longo das bordas da rodovia para que a água coletada pelas sarjetas possa ser encaminhada para fora do corpo estradal. Entretanto, não faz parte do escopo deste TCC dimensionar esses elementos. Ainda assim, os mesmos estão indicados no projeto de drenagem.

4.11. Desenhos em CAD do Projeto (Etapa D1)

Neste tópico é apresentado o projeto de drenagem desenvolvido no AutoCAD, com os devidos elementos de drenagem dispostos ao longo da rodovia. As Figuras 13, 14, 15, 16 e 17 ilustram todos os pontos da rodovia.

Figura 13 – Drenagem da Rodovia (Estacas 0 a 20)

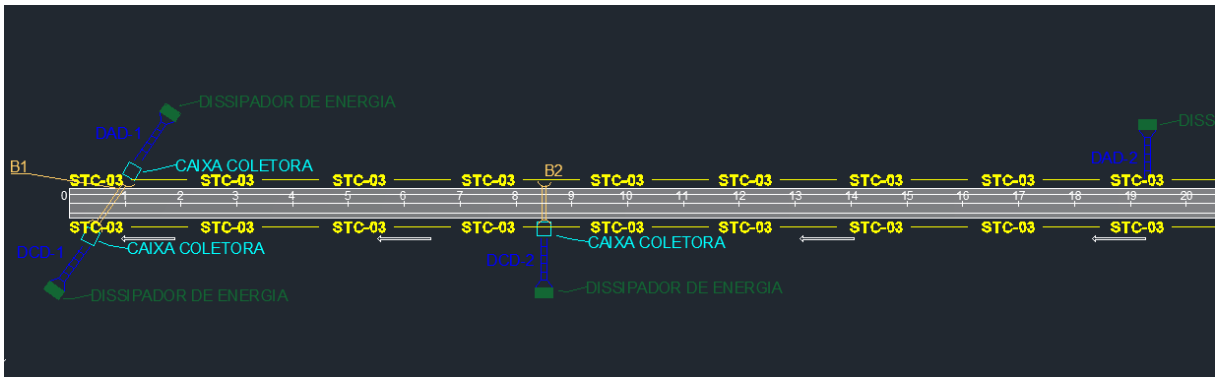


Figura 14 - Drenagem da Rodovia (Estacas 21 a 40)

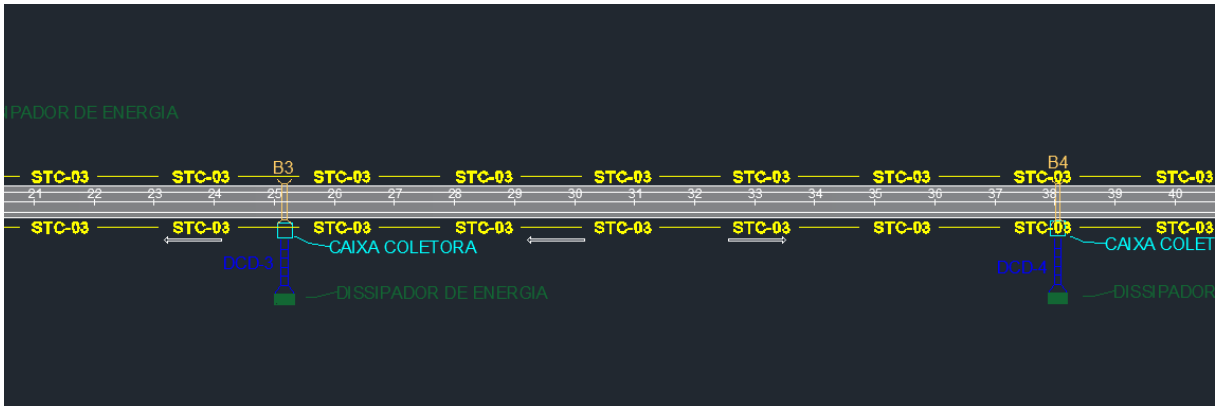


Figura 15 - Drenagem da Rodovia (Estacas 41 a 60)

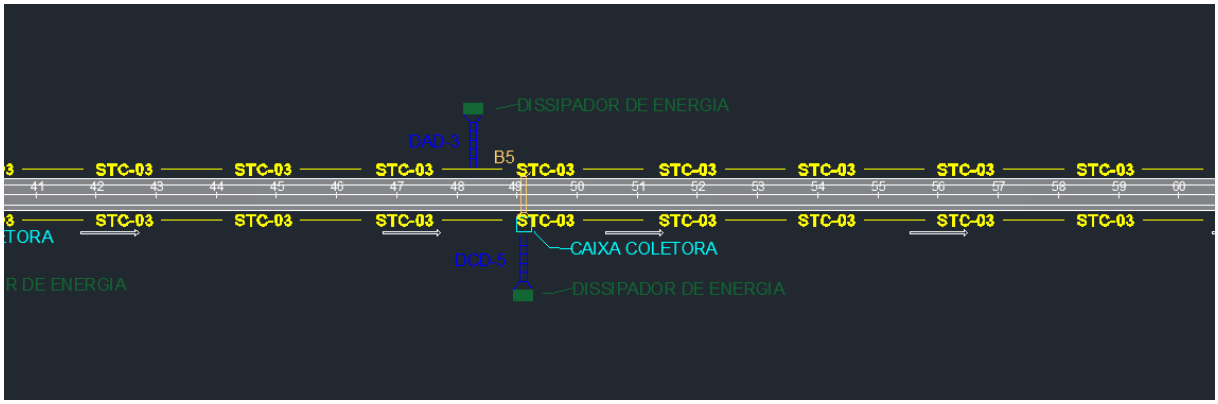


Figura 16 - Drenagem da Rodovia (Estacas 61 a 80)

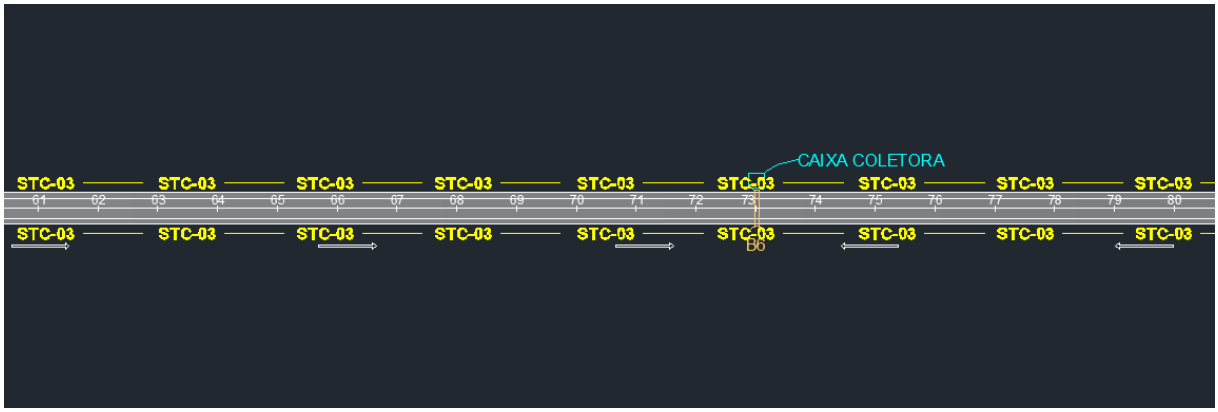
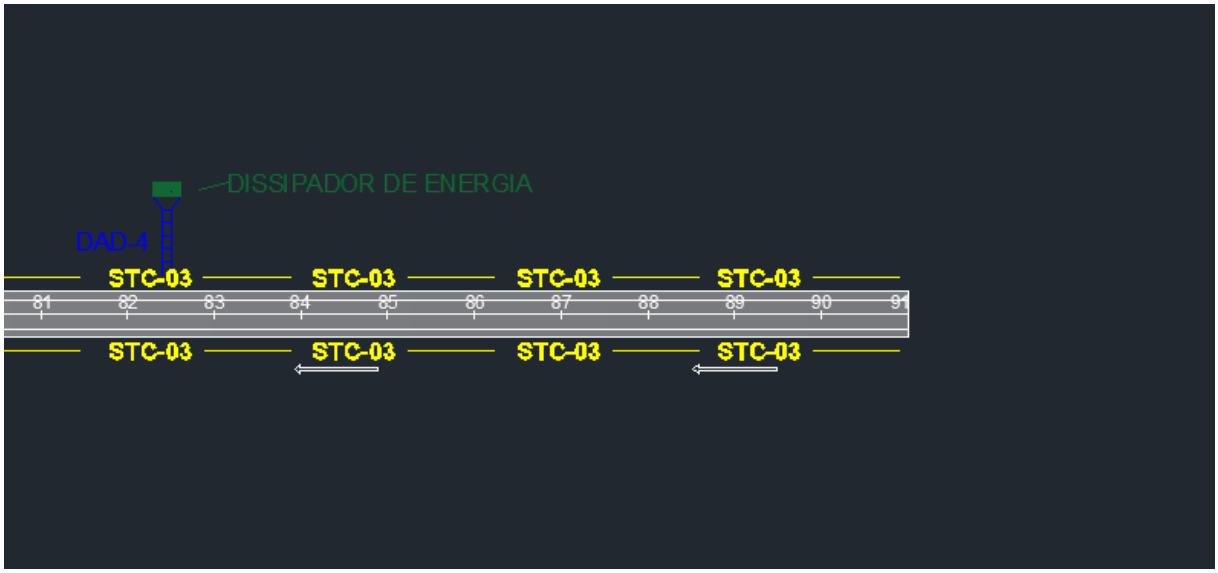


Figura 17 - Drenagem da Rodovia (Estacas 81 a 91)



4.12. Considerações Finais

O dimensionamento dos elementos de drenagem se mostrou bem eficiente para o que foi proposto inicialmente. Porém, deve ser ressaltado que a irregularidade do terreno e os desníveis acentuados foram fatores que dificultaram a idealização do projeto. Em alguns trechos, pequenas extensões geravam elevadas declividades, o que se torna um fator de risco para a integridade do dispositivo tendo em vista o excesso de velocidade gerado. Além disso, o greide projetado gerava situações de grandes áreas de acúmulo de água, exigindo maior capacidade hidráulica do elemento de drenagem receptor.

Além disso, cabe ressaltar que alguns fatores limitaram a precisão buscada na pesquisa. Um deles se refere à largura efetiva dos taludes de contribuição, tendo em vista que houve a necessidade de aplicar a relação encontrada em manuais para que esse valor fosse determinado. Outro fator é referente à definição do tipo de material presente no terreno natural. Como não havia uma definição clara, foi preciso estipular que se tratava de um solo sem revestimento com permeabilidade moderada, utilizando para isso um valor médio dentro do intervalo proposto na Tabela 9.

A dificuldade na obtenção de projetos de drenagem de outras rodovias também foi um fator limitante para verificar a precisão dos resultados. A utilização de projetos de drenagem como o da Rodovia BR-422 poderia vir a ser um balizador para a pesquisa

em questão, tendo em vista que indicaria os aspectos analisados na a escolha da melhor solução para o local, como o menor consumo de materiais, a viabilidade executiva e a facilidade na obtenção de peças e equipamentos.

Entretanto, é importante destacar que vários dispositivos de drenagem do álbum de projetos-tipo do DNIT poderiam ter sido utilizados, tendo em vista que grande parte deles atendiam à solicitação de projeto. Contudo, a utilização da solução mais econômica - no que tange ao consumo de materiais - tem como explicação a elaboração de um projeto mais adequado aos parâmetros orçamentários que, em geral, determinam a escolha por uma proposta de execução.

Por fim, é fundamental um correto dimensionamento e interpretação dos resultados. A partir dos valores calculados, foi possível perceber que a utilização dos manuais do DNIT se mostrou satisfatória para o projeto, dando a possibilidade de escolha não somente do ponto de vista técnico, mas também econômico.

5. CONCLUSÃO

A ação da água tem o poder de provocar inúmeros danos aos pavimentos e ao seu entorno. Em virtude disso, uma drenagem adequada da via pode evitar tais problemas e aumentar a vida útil do pavimento. Rodovias que não possuem um sistema de drenagem bem dimensionado e conservado simplesmente não conseguem atingir a vida útil projetada e apresentam defeitos precoces, prejudicando a segurança viária dos usuários que transitam pelo local.

Com o intuito de minimizar a ação danosa da água ao pavimento e garantir a segurança de quem vier a utilizar a rodovia, neste trabalho foi realizado um projeto de drenagem com base nos manuais do DNIT, obtendo êxito não somente do ponto de vista técnico, mas também econômico, tendo em vista que foi possível apontar soluções que melhor atendiam às solicitações de projeto e, simultaneamente, reduziam custos com materiais e execução.

Sendo assim, os principais resultados encontrados foram:

- A seção-tipo adotada para as sarjetas foi a STC-03, com comprimento crítico mínimo de 545,17m (trecho curvo em corte) e máximo de 1236,12m (trecho reto em aterro);
- A maior velocidade foi de 3,71m/s, abaixo da velocidade máxima permitida para sarjetas de concreto, que é de 4,5m/s;
- A maior vazão real na borda direita da rodovia foi de 0,269m³/s, ocorrendo na sarjeta S2 (presente no trecho 2), onde a plataforma se encontra em situação de corte;
- A maior vazão real na borda esquerda da rodovia foi de 0,201m³/s, ocorrendo também na sarjeta S2 (presente no trecho 2), onde a plataforma se encontra em situação de corte;
- A seção-tipo adotada para as valetas de proteção de corte foi a VPC-04, com maior vazão solicitante de 0,39m³/s ocorrendo na valeta V19;
- A seção-tipo adotada para as valetas de proteção de aterro foi a VPA-04, com maior vazão solicitante de 0,23m³/s ocorrendo na valeta V18;
- A descida d’água escolhida foi do tipo DCD-04, com largura de 0,80m e altura de 1,00m;

- Os bueiros de greide adotados foram do tipo BSCC, com base e altura de 1,50m;
- A vazão suportada pelos bueiros é de 4,75m³/s, atingindo uma velocidade máxima de 2,46m/s (abaixo do máximo permitido para os elementos em concreto).

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Devido às limitações da pesquisa, apresentam-se a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros que podem enriquecer ainda mais o projeto.

- Buscar conhecer o tipo de material presente no terreno natural ao redor da rodovia, para que assim seja possível definir com maior precisão o coeficiente de escoamento (C) do terreno;
- Realizar os projetos de drenagem sub-superficial, profunda e de transposição de talvegue;
- Variar a chuva de projeto em ± 25%;
- Modificar a declividade do bueiro para, por exemplo, 1%;
- Alterar a relação entre a altura da lâmina d'água e o diâmetro/altura do bueiro, visando encontrar outros cenários para a vazão no dispositivo;
- Aprofundar o estudo acerca dos parâmetros adotados – e seus respectivos pesos - na escolha da solução mais econômica para o projeto, utilizando softwares que forneçam índices orçamentários;
- Comparar com as soluções adotadas para o projeto de drenagem da Rodovia BR-422.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, Thays Vieira. **Determinação de Coeficientes de Rugosidade Equivalentes do Rio Doce**. 2017. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, 2017. p. 20-25. Disponível em: https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/labhidromec/Determinacao%20de%20coeficientes%20de%20rugosidade%20equivalentes%20do%20Rio%20Doce.pdf. Acesso em: 31 de out. 2022.

ALVES, A. F. G. R. **Problemas de Drenagem em Rodovias**: Estudo de Caso Rodovia SC135 Km 112 - 119,5. 2019. 135 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Alto Vale do Rio do Peixe, Caçador, 2019. Disponível em: https://periodicos.uniarp.edu.br/index.php/ignis/article/view/2577. Acesso em: 3 de nov. 2022.

AMP ENG. **Conheça a importância da drenagem em seu projeto**. Disponível em: https://blog.ampeng.com.br/conservacao/conheca-a-importancia-da-drenagem-em-seu-projeto#:~:text=Fazer%20a%20drenagem%20superficial%20ou,taludes%20e%20desn%C3%ADveis%2C%20em%20geral. Acesso em: 19 out. 2022.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Projeto Executivo de Engenharia para Obras de Duplicação da Rodovia BR-316.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, 2017.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Álbum de Projetos-Tipo de Dispositivos de Drenagem**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, 2018.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Manual de Drenagem de Rodovias**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, 2006.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, 2005.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Manual de Projetos Geométricos de Rodovias Rurais**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER, 1999. p. 73-87.

CAMPOS, Renato Batista; MOTA, Hélio Silva**. Sistema de Drenagem Superficial em Rodovias Pavimentadas**. Anuais do 3º Simpósio de TCC das faculdades FINOM e Tecsoma. 2020; 863-878. Disponível em: https://finom.edu.br/assets/uploads/cursos/tcc/202102051502024.pdf. Acesso em: 3 nov. 2022.

ESTRATÉGIA CONCURSOS. **Prova Prefeitura São Bernardo do Campo comentada – cargo: arquiteto (banca VUNESP)**. Disponível em: https://www.estrategiaconcursos.com.br/blog/prova-prefeitura-sao-bernardo-do-campo-comentada-cargo-arquiteto-banca-vunesp-2/. Acesso em: 11 out. 2022.

JABÔR, Marcos Augusto. **Drenagem de Rodovias**: Estudos Hidrológicos e Projetos de Drenagem. 16. ed. Minas Gerais: Campos Jabôr, 2019.

JÚNIOR, E. H. N; VICENTIN, Marcelo Ciani. **Proposta de Adequação Ambiental para a Cidade da Criança de Presidente Prudente - SP**. 2012. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012. p. 23-32. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/120132. Acesso em: 27 de out. 2022.

LEE, Shu Han. **Introdução ao projeto geométrico de rodovias**. Florianópolis: UFSC, 2000. Pg 78.

LIMA, W. A. D. S. *et al*. Sistemas de Drenagem: A Importância para a Infraestrutura do Transporte Rodoviário Brasileiro. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 8, n. 3, p. 17813-17831, mar./2022.

MENDES, I. M. D. S; RÊGO, P. M. M. D. **Determinação de Equações de Chuvas Intensas para o Estado do Pará com Foco nas Obras de Drenagem Rodoviária.** 2021. 108 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021. Disponível em: https://bdm.ufpa.br:8443/handle/prefix/3628. Acesso em: 11 de out. 2022.

PASSOS, M. L. V; RAPOSO, Anselmo Baganha; MENDES, Telmo José. Análise de Eventos Pluviométricos Extremos no Município de Chapadinha - MA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, UFMA, v. 11, n. 3, p. 1476-1483, jun./2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317596564_ANALISE_DE_EVENTOS_PLUVIOMETRICOS_EXTREMOS_NO_MUNICIPIO_DE_CHAPADINHA-MA. Acesso em: 24 out. 2022.

PINHEIRO, Martônio Ribeiro; **Análise de Cenários que Influenciam na Relação Custo/Benefício no Projeto Geométrico de uma Curva Horizontal com Transição.** 2021. 78 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021. Disponível em: https://bdm.ufpa.br:8443/handle/prefix/3619. Acesso em: 10 de ago. 2022.

PIZA, Francisco. **Condutos Livres**. 1. ed. Disponível em: https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2013/09/apostila-de-hidraulica.pdf, 2013. Acesso em: 17 nov. 2022.

PORTO, Júlia Alves. **Avaliação de Dispositivos de Drenagem Superficial em Rodovias Rurais Quanto à Segurança de Circulação**. 2018. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24834/1/2018_JuliaAlvesPorto_tcc.pdf. Acesso em: 14 de out. 2022.

ROCHA, Diego Daibert. **Avaliação do Projeto de Drenagem de Transposição de Talvegues da Rodovia Municipal que Interliga a Rodovia MG-457 ao Município de Passa Vinte/Minas Gerais**. 2013. 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013. Disponível em: https://www2.ufjf.br/engenhariacivil//files/2012/10/TFC-Diego-Daibert-Final.pdf. Acesso em: 3 de nov. 2022.

SILVA, G. Í. N. D. *et al*. Entendendo as Características Associadas à Precipitação para uma Região do Nordeste do Pará: Uma Análise do Comportamento, Tendência, Eventos Extremos e Tempo de Retorno para o período de 1973-2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, UFPE, v. 14, n. 6, p. 3177-3192, ago./2021. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe. Acesso em: 27 out. 2022.

SOUZA, L. N. N. D. **Estudo Hidrológico e Hidráulico dos Canais de Drenagem das Microbacias Urbanas de Macaé**. 1. ed. Macaé: UFRJ, 2019. p. 39-46.

VIANA, H. M. F. **Introdução à Drenagem de Pavimentos**. Disponível em: https://engcivil20142.files.wordpress.com/2017/08/notas-de-aulas-parte-14.pdf. Acesso em: 17 nov. 2022.

APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DE BUEIROS NO REGIME SUBCRÍTICO

- *Bueiros Tubulares*

Com base nas equações apresentadas no capítulo 2, a sequência das operações é realizada da seguinte forma:

a) Admite-se inicialmente um valor para a relação d/D, variando de 0,20 a 0,80, optando-se em geral pelo valor máximo;
b) Com o valor adotado para a relação d/D, entra-se na tabela dos tubos parcialmente cheios, para obtenção do coeficiente Kq;
c) Com Kq determina-se o valor do diâmetro teórico e se este mostrar-se inadequado pelas restrições do local de assentamento ou por não existir comercialmente tubo com diâmetro de tal porte, deverá ser considerado bueiro de seção múltipla, dividindo-se a descarga de projeto pelo número de linhas de tubo a adotar. Ao final será fixado para a linha de tubos simples ou múltipla o diâmetro mais próximo comercialmente disponível;
d) Com o diâmetro comercial calcula-se o novo valor de Kq, obtendo-se na tabela a relação d/D, e o valor de Kv, que fornecerá o valor de V, comparando a velocidade de escoamento com os valores mínimo e máximo aceitáveis, função da sedimentação das partículas em suspensão e da erosão das paredes dos tubos;
e) Se os valores acima estiverem dentro dos limites estabelecidos, o dimensionamento é concluído; caso contrário, faz-se uma nova tentativa com outra relação d/D, procurando-se aumentar ou diminuir a velocidade.

- *Bueiros Celulares*

A partir das equações apresentadas no capítulo 2, a sequência de operações segue o descrito a seguir:

a) Arbitra-se, inicialmente, valores para a largura da base (B) e da altura (H) do bueiro.
b) Calcula-se a vazão de contribuição pelo Método Racional Corrigido ou Modificado, aplicando um coeficiente de retardo (φ) que corrige os efeitos da

distribuição de chuvas dentro de uma grande bacia. A Equação 21 mostra como definir esse coeficiente.

$$\varphi = A^{-0,10\ ou -0,15} \tag{21}$$

Em que:

A é a área da bacia de contribuição (km²).

O expoente -0,10 é aplicado para áreas rurais, enquanto que o valor de -0,15 é utilizado em áreas urbanas.

c) É realizada, então, a verificação do regime de escoamento através da aplicação da Equação 14 anteriormente mencionada. No caso da declividade for de fato inferior à declividade crítica, segue-se com o dimensionamento.

d) Aplica-se a fórmula de Manning para o cálculo da vazão suportada pelo bueiro, levando-se em conta que o DNIT exige que a lâmina d'água máxima fique a 80% da altura.

e) Caso a vazão suportada seja menor que a vazão de contribuição, pode-se: passar de bueiro simples para bueiro duplo (ou triplo, a depender do caso); aumentar a seção do bueiro; aumentar a declividade.

   Obs.: Deve-se ter precaução ao aumentar a declividade, já que esta pode levar a um regime crítico. Neste caso, é importante verificar a vazão crítica para o regime supercrítico.

f) Por fim, calcula-se a velocidade de escoamento no bueiro a partir da determinação da altura da lâmina d'água para a vazão de solicitação calculada. Aqui é aplicado o método de tentativas para essa determinação. Com a altura definida, utiliza-se a Equação 17 anteriormente mencionada.

g) Estando o valor de V entre os limites permitidos e atendendo às condições locais, dá-se o dimensionamento como aceito. Caso contrário, procura-se, mediante novas tentativas, dimensões que conduzam a valores aceitáveis.

APÊNDICE B – TABELA DAS LARGURAS DOS TALUDES DE CONTRIBUIÇÃO

LARGURA DOS TALUDES DE CONTRIBUIÇÃO				
Estaca	*L Ate e (m)*	*L Corte e (m)*	*L Ate d (m)*	*L Corte d (m)*
0	3,85		1,19	
1		0,47		1,10
2		1,64		2,11
3		1,71		2,23
4		1,74		2,13
5		1,63		2,02
6		1,51		1,94
7		1,37		2,00
8		1,28		2,10
9		1,66		2,26
10		1,41		2,08
11		1,22		1,88
12		0,88		1,37
13		0,61		1,43
14		0,95		1,58
15		1,22		1,89
16		1,51		2,34
17		1,71		2,55
18		1,06		1,74
19		0,26		0,77
20	0,80			0,27
21	0,95			0,16
22	0,41			0,54
23		0,05		0,74
24		0,00		0,58
25	0,80			0,14
26	2,20		1,35	
27	3,21		2,49	
28	4,68		3,42	
29	4,97		3,58	
30	5,07		3,37	
31	4,24		2,83	
32	4,07		2,37	
33	3,83		2,01	
34	5,00		2,59	
35	5,57		3,47	
36	6,41		3,45	

LARGURA DOS TALUDES DE CONTRIBUIÇÃO				
Estaca	*L Ate e (m)*	*L Corte e (m)*	*L Ate d (m)*	*L Corte d (m)*
37	5,43		1,78	
38	5,51			0,02
39	4,06			0,08
40	2,45			0,09
41	1,19			0,46
42		0,15		0,95
43		0,58		1,40
44		0,95		1,89
45		1,34		2,14
46		1,33		2,16
47		1,10		1,69
48		0,35		0,86
49	1,09			0,03
50	2,75		1,29	
51	3,61		1,37	
52	4,25		1,85	
53	3,65		2,68	
54	2,68		1,59	
55	2,25		0,78	
56	2,09		0,90	
57	2,83		1,12	
58	3,95		1,86	
59	4,70		3,00	
60	4,70		3,08	
61	4,62		3,35	
62	4,24		2,92	
63	3,24		2,52	
63	3,15		2,61	
64	3,00		3,44	
65	2,13		4,33	
66	2,07		5,48	
66	1,78		1,54	
67	1,59		1,80	
68	0,80		1,01	
69	0,80		1,01	
70	0,96		1,17	
71	2,17		2,49	
72	2,72		1,80	
73	3,80		4,00	

LARGURA DOS TALUDES DE CONTRIBUIÇÃO				
Estaca	*L Ate e (m)*	*L Corte e (m)*	*L Ate d (m)*	*L Corte d (m)*
74	5,99		5,56	
75	9,20		7,63	
76	9,02		7,42	
77	7,04		5,52	
78	5,47		4,62	
79	4,27		3,39	
80	3,62		2,28	
81	2,40		1,33	
81	1,69			0,37
82	0,69			0,70
83		1,05		2,12
84		3,13		4,20
84		3,59		4,48
85		3,84		4,80
86		4,23		4,98
87		4,29		5,03
88		4,50		5,03
89		4,37		4,90
89		4,23		4,62

APÊNDICE C – DIVISÃO DOS TRECHOS DA RODOVIA

Figura 18 - Identificação dos Trechos 1 e 2 (borda direita) e 1 a 4 (borda esquerda)

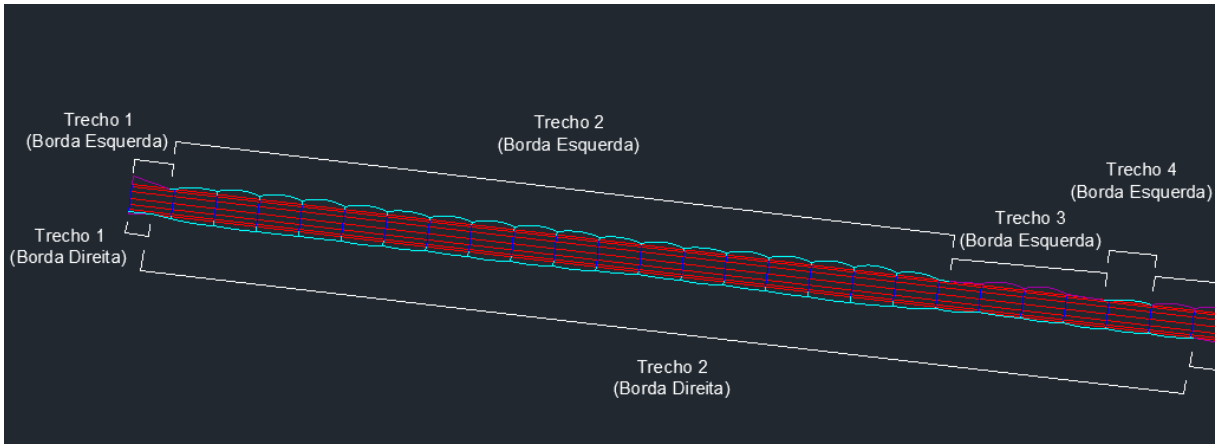


Figura 19 - Identificação dos Trechos 3, 4 e 5 (borda direita) e 5, 6 e 7 (borda esquerda)

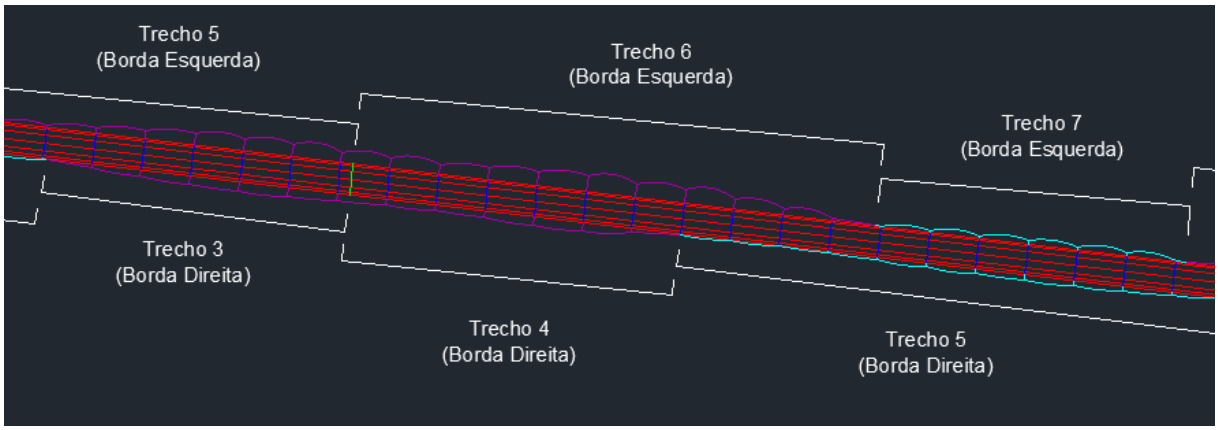


Figura 20 - Identificação dos Trechos 6 (borda direita) e 8 (borda esquerda)

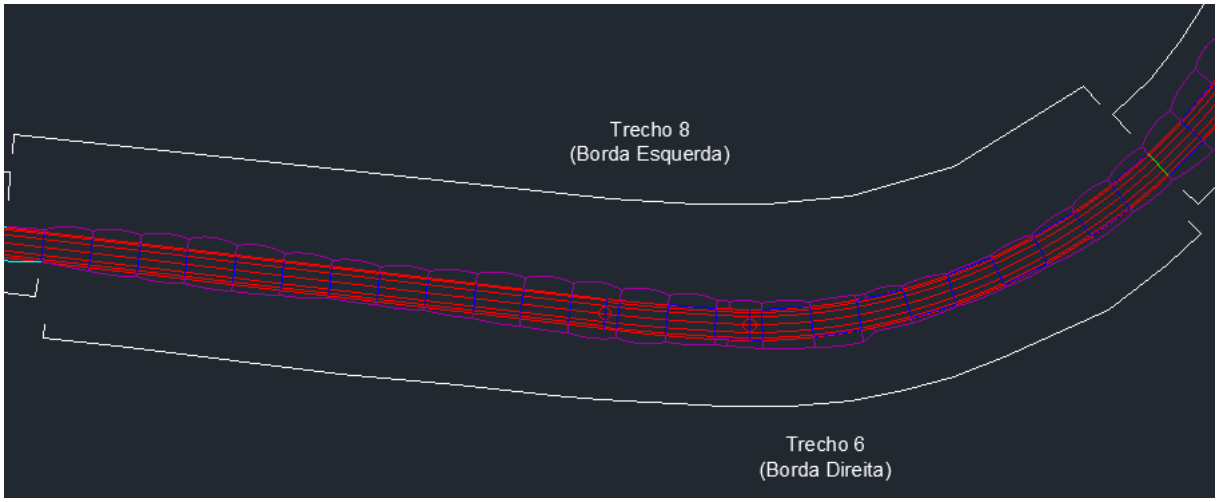
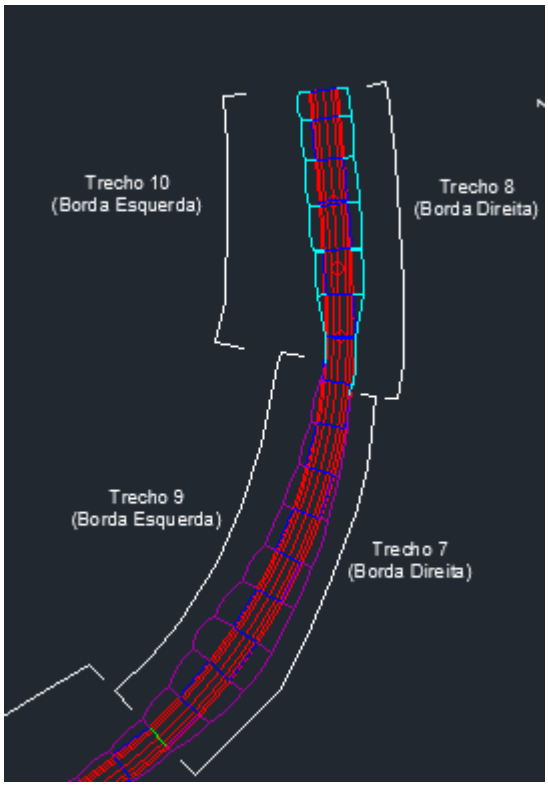


Figura 21 - Identificação dos Trechos 7 e 8 (borda direita) e 9 e 10 (borda esquerda)



APÊNDICE D – TABELA DE DIMENSIONAMENTO DAS VALETAS

VALETA	TIPO	DECLIVIDADE (m/m)	ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (m²)	Q1 (m³/s)	Q2 (m³/s)				V (m/s)			
					VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04	VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04
V1	VPA	0,132	2079,50	0,03	1,67	1,07	2,61	1,65	4,29	3,95	7,62	7,03
V2	VPC	0,042	18156,70	0,23	0,94	0,60	1,47	0,93	2,41	2,22	4,28	3,95
V3	VPC	0,029	11265,46	0,14	0,78	0,50	1,22	0,77	2,00	1,84	3,55	3,27
V4	VPC	0,009	11456,45	0,14	0,43	0,27	0,67	0,42	1,10	1,01	1,95	1,80
V5	VPC	0,022	2624,39	0,03	0,68	0,43	1,06	0,67	1,74	1,60	3,10	2,86
V6	VPC	0,022	5400,95	0,07	0,69	0,44	1,08	0,68	1,77	1,63	3,14	2,90
V7	VPC	0,016	11076,35	0,14	0,57	0,37	0,90	0,57	1,47	1,36	2,62	2,41
V8	VPC	0,015	4470,31	0,06	0,57	0,36	0,89	0,56	1,46	1,35	2,60	2,39
V9	VPC	0,008	3018,79	0,04	0,42	0,27	0,66	0,42	1,08	0,99	1,92	1,77
V10	VPC	0,012	4542,04	0,06	0,51	0,32	0,79	0,50	1,30	1,20	2,31	2,13
V11	VPC	0,034	4606,88	0,06	0,85	0,54	1,32	0,83	2,17	2,00	3,85	3,55
V12	VPC	0,019	4708,87	0,06	0,64	0,41	0,99	0,63	1,63	1,50	2,89	2,67
V13	VPC	0,008	6032,49	0,07	0,41	0,26	0,63	0,40	1,04	0,96	1,85	1,71
V14	VPC	0,002	9972,32	0,12	0,20	0,13	0,31	0,19	0,51	0,47	0,90	0,83
V15	VPA	0,012	3792,82	0,05	0,50	0,32	0,79	0,50	1,29	1,19	2,29	2,11
V16	VPC	0,014	17627,51	0,22	0,54	0,35	0,85	0,54	1,40	1,28	2,48	2,29
V17	VPC	0,011	8099,13	0,10	0,47	0,30	0,74	0,47	1,21	1,12	2,15	1,99
V18	**VPA**/VPC	0,009	18688,40	0,23	0,44	0,28	0,68	0,43	1,12	1,03	1,98	1,83
V19	VPC	0,011	31010,47	0,39	0,49	0,31	0,77	0,48	1,26	1,16	2,24	2,06
V20	VPC	0,007	8186,99	0,10	0,40	0,25	0,62	0,39	1,02	0,94	1,80	1,66
V21	VPC	0,006	13115,13	0,16	0,35	0,22	0,55	0,35	0,90	0,83	1,60	1,48
V22	VPC	0,024	7207,35	0,09	0,71	0,45	1,11	0,70	1,82	1,68	3,24	2,99

VALETA	TIPO	DECLIVIDADE (m/m)	ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (m²)	Q1 (m³/s)	Q2 (m³/s)				V (m/s)			
					VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04	VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04
V23	VPC	0,005	19631,07	0,24	0,32	0,21	0,50	0,32	0,82	0,76	1,46	1,35
V24	VPC	0,019	15309,88	0,19	0,63	0,40	0,98	0,62	1,61	1,48	2,86	2,64
V25	VPC	0,008	20595,58	0,26	0,40	0,26	0,63	0,40	1,03	0,95	1,83	1,69
V26	VPC	0,025	10438,68	0,13	0,72	0,46	1,13	0,71	1,85	1,70	3,29	3,03
V27	VPC	0,011	5916,94	0,07	0,48	0,31	0,75	0,47	1,23	1,13	2,19	2,02
V28	VPC	0,008	18350,76	0,23	0,42	0,27	0,65	0,41	1,07	0,98	1,90	1,75
V29	VPC	0,010	10787,65	0,13	0,45	0,29	0,71	0,45	1,16	1,07	2,06	1,90
V30	VPC	0,035	8709,07	0,11	0,86	0,55	1,34	0,85	2,20	2,03	3,91	3,61
V31	VPC	0,020	3418,24	0,04	0,65	0,41	1,01	0,64	1,66	1,53	2,95	2,72
V32	VPC	0,025	4219,73	0,05	0,74	0,47	1,15	0,73	1,89	1,74	3,35	3,09
V33	VPC	0,015	4652,09	0,06	0,56	0,36	0,88	0,56	1,45	1,33	2,57	2,37
V34	VPC	0,017	3152,01	0,04	0,60	0,38	0,93	0,59	1,53	1,41	2,73	2,51
V35	VPC	0,018	3473,32	0,04	0,61	0,39	0,95	0,60	1,56	1,44	2,78	2,56
V36	VPC	0,019	5378,73	0,07	0,63	0,40	0,98	0,62	1,61	1,49	2,87	2,64
V37	VPC	0,007	4652,09	0,06	0,38	0,24	0,59	0,37	0,96	0,89	1,71	1,58
V38	VPC	0,022	4646,89	0,06	0,69	0,44	1,08	0,68	1,77	1,63	3,14	2,90
V39	VPC	0,012	3473,32	0,04	0,49	0,32	0,77	0,49	1,27	1,17	2,25	2,08
V40	VPC	0,023	4594,18	0,06	0,70	0,44	1,09	0,69	1,78	1,64	3,17	2,92
V41	VPC	0,007	8549,62	0,11	0,38	0,24	0,60	0,38	0,98	0,90	1,74	1,60
V42	VPC	0,017	8692,27	0,11	0,60	0,38	0,94	0,60	1,55	1,43	2,75	2,54
V43	VPC	0,008	6728,58	0,08	0,41	0,26	0,63	0,40	1,04	0,96	1,85	1,71
V44	VPC	0,016	3661,92	0,05	0,59	0,38	0,92	0,58	1,52	1,40	2,69	2,48
V45	VPC	0,037	4577,16	0,06	0,88	0,56	1,38	0,87	2,26	2,08	4,01	3,70
V46	VPC	0,009	20734,12	0,26	0,43	0,27	0,66	0,42	1,09	1,00	1,94	1,79
V47	VPC	0,020	5695,02	0,07	0,65	0,42	1,02	0,64	1,67	1,54	2,97	2,74

VALETA	TIPO	DECLIVIDADE (m/m)	ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (m²)	Q1 (m³/s)	Q2 (m³/s)				V (m/s)			
					VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04	VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04
V48	VPA	0,044	8056,49	0,10	0,96	0,61	1,50	0,95	2,47	2,27	4,38	4,04
V49	VPC	0,007	13714,47	0,17	0,38	0,24	0,59	0,38	0,98	0,90	1,73	1,60
V50	VPC	0,022	8376,58	0,10	0,68	0,44	1,07	0,67	1,75	1,61	3,11	2,87
V51	VPA	0,046	6930,78	0,19	0,99	0,63	1,54	0,97	2,53	2,33	4,50	4,15
V52	VPA	0,069	9909,5	0,17	1,21	0,77	1,89	1,19	3,10	2,85	5,50	5,08
V53	VPC	0,010	18568,21	0,23	0,46	0,29	0,71	0,45	1,17	1,08	2,08	1,92
V54	VPC	0,013	12211,79	0,15	0,53	0,34	0,82	0,52	1,35	1,25	2,40	2,22
V55	**VPC**/VPA	0,159	825,89	0,05	1,84	1,17	2,87	1,81	4,72	4,34	8,37	7,73
V56	VPC	0,014	25429,02	0,32	0,54	0,34	0,84	0,53	1,39	1,28	2,46	2,27
V57	VPC	0,009	28871,36	0,36	0,43	0,27	0,67	0,42	1,10	1,01	1,95	1,80
V58	VPC	0,041	3346,55	0,04	0,94	0,60	1,46	0,92	2,40	2,21	4,26	3,93

APÊNDICE E – TABELA DE CORREÇÃO DA VAZÃO SUPORTADA EM VALETAS COM VELOCIDADE EXCESSIVA

VALETA	Q1 (m^3/s)	Rh limite (p/ Vmáx=1,8m/s)	Rh limite (p/ Vmáx=4,5m/s)	Condição p/ Rh				h(lâmina d'água)				Q2 (real)			
				VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04	VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04	VPC-01/VPA-01	VPC-02/VPA-02	VPC-03/VPA-03	VPC-04/VPA-04
V1	0,03	0,05728	0,08818	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04	0,06	0,06	0,07	0,04	0,26	0,17
V2	0,23	0,13593		0,15	0,14			0,20	0,20			0,44	0,29		
V3	0,14	0,18024		0,18	0,18			0,25	0,29			0,55	0,46		
V11	0,06	0,15957		0,16	0,16			0,21	0,24			0,46	0,37		
V22	0,09	0,20703		0,21				0,29				0,68			
V26	0,13	0,20221		0,20				0,28				0,66			
V30	0,11	0,15590		0,15	0,16			0,20	0,24			0,44	0,36		
V32	0,05	0,19679		0,20				0,27				0,63			
V45	0,06	0,14987		0,14	0,14			0,17	0,20			0,19	0,15		
V48	0,10	0,13150		0,13	0,13			0,16	0,19			0,20	0,15		
V51	0,19	0,12645		0,14	0,13			0,17	0,18			0,21	0,15		
V52	0,17	0,09336	0,14373	0,09	0,09	0,14	0,14	0,11	0,12	0,18	0,21	0,16	0,11	0,70	0,55
V55	0,05	0,04974	0,07658	0,05	0,05	0,08	0,08	0,06	0,06	0,09	0,10	0,12	0,08	0,48	0,34
V58	0,04	0,13696		0,14	0,14			0,17	0,20			0,21	0,16		

APÊNDICE F – CÁLCULO DA ALTURA DE LÂMINA D'ÁGUA NOS BUEIROS CELULARES

Para determinar a altura de lâmina d'água no bueiro tubular, é necessário aplicar um teste de hipóteses a partir da função "atingir meta" no Excel. Utilizando a Fórmula de Manning e aplicando o maior valor de vazão de solicitação na igualdade, encontrou-se um valor que serviu de referência na determinação dessa altura. A expressão seguinte mostra como foi realizado esse procedimento.

$$3{,}42 = (1{,}5\ x\ H)\ x\ \frac{(\frac{1{,}5\ x\ H}{1{,}5 + 2\ x\ H})^{2/3}\ x\ 0{,}005^{1/2}}{0{,}016}$$

Chegando, assim, à seguinte expressão:

$$0{,}774 = (1{,}5\ x\ H)\ x\ (\frac{(1{,}5\ x\ H)}{1{,}5 + 2\ x\ H})^{\frac{2}{3}}$$

Assim, a Tabela 32 mostra os valores arbitrados para a altura da lâmina d'água, até que se chegasse ao valor mais próximo de 0,774.

Tabela 32 - Altura da Lâmina D'Água pelo Método das Tentativas

H	Valor
0,8	0,637
0,9	0,744
0,93	0,776

Aplicando esse valor na expressão do raio hidráulico e utilizando a Equação 17, foi possível determinar que a velocidade de escoamento no bueiro é de 2,46m/s.