

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DE  
ENCOSTAS PARA PROJETOS DE ESTRADAS BASEADO NO  
ÍNDICE DE QUALIDADE HSQI: PROPOSTA  
METODOLÓGICA E VALIDAÇÃO**

**CARLOS ARTURO MORENO CEBALLOS**

**ORIENTADOR: HERNÁN MARTÍNEZ CARVAJAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-256/15**

**BRASÍLIA/DF: SETEMBRO – 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOTECNICA DE ENCOSTAS PARA  
PROJETOS DE ESTRADAS BASEADO NO INDICE DE QUALIDADE  
HSQI: PROPOSTA METODOLÓGICA E VALIDAÇÃO**

**CARLOS ARTURO MORENO CEBALLOS**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM GEOTECNIA.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Hernán Eduardo Martínez Carvajal, Dr. (ENC-UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. Andre Luís Brasil Cavalcante, Ph.D. (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Paulo Ruiz Cubillo, Ph.D. (LANAMME-UCR)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 24 SETEMBRO DE 2015**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MORENO-CEBALLOS, CARLOS ARTURO

Sistema de classificação geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no índice de qualidade HSQI: Proposta metodológica e validação [Distrito Federal] 2015.

xxii, 104p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2015).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estabilidade de taludes

2. Índice de qualidade de encosta

3. Estradas em montanha

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORENO-CEBALLOS, C. A. (2015). Sistema de classificação geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no índice de qualidade HSQI: Proposta metodológica e validação. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-256/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Carlos Arturo Moreno Ceballos.

TÍTULO: Sistema de classificação geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no índice de qualidade HSQI: Proposta metodológica e validação. Dissertação de Mestrado em Geotecnia.

GRAU: Mestre

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Carlos Arturo Moreno Ceballos  
CLN 203, Bl. C, apto. 217 – Asa Norte  
Brasília, DF – Brasil  
carlosmoreno.990@gmail.com

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus a minha força interior em todos os momentos e por colocar em minhas mãos todas as oportunidades e os elementos para aproveitá-las.

A meus pais Rudine e Fernando e aos meus irmãos Andrea e Manuel, por todo o seu apoio nas decisões tomadas e pela sua companhia à distância.

Ao meu orientador Hernán Martínez, pelas suas ideias e pelo apoio no desenvolvimento desta dissertação.

A todos os meus amigos, aqui em Brasília, que fizeram a minha estadia na cidade uma experiência muito divertida e inesquecível.

## RESUMO

### **SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DE ENCOSTAS PARA PROJETOS DE ESTRADAS BASEADO NO ÍNDICE DE QUALIDADE HSQI: PROPOSTA METODOLÓGICA E VALIDAÇÃO**

Desenvolveu-se uma metodologia de classificação geotécnica de encostas em rodovias de zonas tropicais montanhosas, considerando o uso combinado de fatores geomorfológicos, hidrológicos e de mecânica de solos e usando o conceito de *Hillslope Quality Index* (HSQI) como um indicador da qualidade da encosta e da sua suscetibilidade a deslizamento.

Esta metodologia, aplicável na fase preliminar dos projetos de estradas, permite dividir a rodovia em zonas segundo a qualidade geotécnica das encostas que serão afetadas na etapa de construção. Como complemento, este método fornece recomendações iniciais de estabilização e drenagem associadas à importância do projeto e à qualidade das encostas que se encontram na rodovia.

A aplicação da metodologia é simples e os resultados oferecem dados próximos ao comportamento real da estabilidade das encostas, o que permite a análise de possíveis imprevistos durante a construção e a estimativa de custos extras devidos a problemas de estabilidade de encostas da obra, levando em conta os sistemas mínimos de estabilização propostos pela metodologia.

A avaliação deste método foi feita em uma rodovia na cidade de Medellín, noroeste da Colômbia, uma zona tropical montanhosa. Os resultados obtidos mostraram que a aplicação desta metodologia de classificação é válida para uma análise de viabilidade de projetos de estradas, pois os valores de qualidade das encostas que definem a suscetibilidade a deslizamento concordam com o comportamento observado na zona de estudo.

Esta metodologia não substitui as análises de estabilidade convencionais e as obras de estabilização e drenagem que se recomendam são válidas para uma análise de viabilidade. Consequentemente, devem ser verificadas por meio de estudos geotécnicos convencionais de campo e laboratório para o projeto detalhado.

Palavras-Chave: Estabilidade de taludes, Índice de qualidade de encosta, Estradas em montanha.

## ABSTRACT

### GEOTECHNICAL CLASSIFICATION METHOD FOR ROADWAYS BASED ON HILLSLOPE QUALITY INDEX (HSQI)

A geotechnical classification method for roadways in tropical mountain zones was developed considering geomorphologic, hydrologic and soil mechanics aspects and introducing the *Hillslope Quality Index* (HSQI) concept as an index to evaluate the hillslopes landslide susceptibility.

This method, which is applicable in the preliminary stage of roadways projects, allows dividing these projects into zones according to their hillslope quality index that may provide an assessment of landslide hazard. Based on that, some recommendations for stabilization solutions may arise that provide an estimation of the project cost from its initial stage.

The HSQI method application is presented as a simple procedure for analyzing the stability of roadways hillslopes and the outcome is similar to the real conditions of stability of actual hillslopes, allowing forecasting possible incidents and extra expenses related to slope instability, given the preliminary stabilization systems suggested by the method.

This study made an investigation, in a tropical mountain zone on the northern Colombian Andes, of a roadway that connects Medellin city with the JMC International Airport to validate the proposed method. The weather of this region presents a bimodal behavior and the geology is mainly composed of metamorphic rocks.

As a conclusion obtained from the preliminary results, this method provides a good estimation of the real stability behavior of the slopes investigated in the Medellin case. Thus, this method provides a reliable decision-making procedure in order to evaluate the technical feasibility of a roadway project prior to construction.

**Keywords:** Slope stability, Hillslope quality index, mountain roadways.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	iv
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. JUSTIFICATIVA .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE TALUDES.....	5
2.1.1. <i>SLOPE MASS RATING</i> (SMR).....	6
2.1.2. <i>SLOPE QUALITY INDEX</i> (SQI).....	7
2.1.3. METODOLOGIA MORA-VHARSON-MORA .....	9
2.1.4. METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE BASEADA NO ÂNGULO CRÍTICO .....	11
2.2. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO – ANÁLISE ROC.....	13
2.3. METODOLOGIAS SIMPLES DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS.....	15
2.3.1. HOEK E BRAY .....	15
2.3.2. ESCOLA DE NANCY.....	17
3. MODELO PROPOSTO E METODOLOGIA DA PESQUISA .....	23
3.1. <i>HILLSLOPE QUALITY INDEX</i> (HSQI).....	23
3.2. HSQI vs. FS.....	29
3.3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA .....	30
3.3.1. COLETA DE INFORMAÇÃO.....	31
3.3.2. CARACTERIZAÇÃO DE ENCOSTAS DE ACORDO COM A SUA GEOMETRIA E DEFINIÇÃO DE SEÇÕES DE ANÁLISE .....	32
3.3.3. ANÁLISE PRELIMINAR DE ESTABILIDADE DAS ENCOSTAS E OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE HSQI .....	34

3.4.	ZONEAMENTO DA ESTRADA .....	34
3.5.	RECOMENDAÇÕES DE ESTABILIZAÇÃO E DRENAGEM.....	36
3.5.1	CORREÇÃO DE ALTURA PARA CONSIDERAR OS SISTEMAS DE PREVENÇÃO.....	36
3.5.2.	GRÁFICO DE DESEMPENHO .....	37
4.	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA .....	40
4.1	LOCALIZAÇÃO.....	40
4.2	RODOVIA LAS PALMAS .....	40
4.3	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS. ....	41
4.4	CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS. ....	44
4.5	COLETA DE INFORMAÇÃO .....	45
4.6	TRABALHO DE CAMPO .....	46
4.7	TRATAMENTOS ENCONTRADOS.....	46
4.7.1	MUROS.....	47
4.7.2	CORTINAS ANCORADAS .....	47
4.7.3	CONCRETO PROJETADO .....	48
4.7.4	DRENAGEM E PROTEÇÃO SUPERFICIAL .....	48
4.8	ANÁLISE DE DADOS .....	50
4.9	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO ROC.....	52
4.10	GRÁFICO DE DESEMPENHO E DE RECOMENDAÇÕES .....	56
5.	ANÁLISE ESTATÍSTICA E EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA HSQI.....	61
5.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA PELO MÉTODO DE ESTIMATIVAS PONTUAIS DA VARIÁVEL HSQI. ....	61
5.2	APLICACÃO DA METODOLOGIA HSQI À ESTRADA LA PINTADA – LA FELISA.....	64

5.2.1	LOCALIZAÇÃO DA ZONA.....	64
5.2.2	CARACTERÍSTICAS DA ZONA.....	65
5.2.3	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA HSQI. ....	65
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	76
6.1	SOBRE A APLICAÇÃO DO HSQI COMO USUÁRIO.....	76
6.2	SOBRE A AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO HSQI.....	77
6.3	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS. ....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	80
	ANEXOS.....	82
	ANEXO 1. TABELAS DO RMRB E DO SMR. ....	82
	ANEXO 2. TABELAS DETALHADAS DO SQL. ....	85
	ANEXO 3. ANÁLISE DE HSQI PARA AS ENCOSTAS DE CAMPO. ....	89
	ANEXO 4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DO HSQI.....	95
	ANEXO 5. REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	98
	ANEXO 6. ZONEAMENTO HSQI DA RODOVIA LAS PALMAS. ....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação qualitativa e quantitativa para o SQI (Pinheiro <i>et al.</i> , 2015).....	7
Tabela 2.2. Categorias da metodologia Mora-Vharson-Mora (Mora, 2013b).....	10
Tabela 2.3. Critérios para classificação da ameaça .....	11
Tabela 2.4. Critérios para classificação da suscetibilidade (modificada de Monge & Mora, 2008). ....	12
Tabela 2.5. Análise ROC.....	13
Tabela 3.1. Taludes analisados com a metodologia HSQI e o programa <i>Geoslope</i> ®.....	29
Tabela 3.2. Valores do índice de qualidade de encostas .....	35
Tabela 3.3. Fatores de correção de altura da encosta .....	37
Tabela 4.1. Modelo do banco de dados .....	50
Tabela 4.2. Resumo dos dados de campo.....	51
Tabela 4.3. Valores do HSQI para cada categoria de suscetibilidade .....	52
Tabela 4.4. Análise ROC para o HSQI .....	52
Tabela 4.5. Resultados da análise ROC para a metodologia HSQI.....	55
Tabela 4.6. Análise ROC das metodologias HSQI, SHIA-LANDSLIDE e SHALLTAB .....	56
Tabela 4.7. Recomendações de obras de tratamento para encostas.....	57
Tabela 5.1. Momentos estatísticos dos parâmetros geotécnicos atrito $\phi$ e coesão $c$ .....	62
Tabela 5.2. Análise de estimativas pontuais na variável HSQI.....	63
Tabela 5.3. Resultados da análise probabilística das categorias do HSQI .....	63
Tabela 5.4. Zoneamento da estrada La Pintada – La Felisa .....	65
Tabela 5.5. Características da encosta E1 .....	66
Tabela 5.6. Fator de correção dependendo da importância da estrada .....	69
Tabela 5.7. Resultados da análise HSQI para a estrada La Pintada – La Felisa.....	70
Tabela 5.8. Zoneamento da estrada La Pintada – La Felisa .....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Condições do lençol freático para análise de taludes pelas cartas de Hoek & Bray .....	16
Figura 2.2. Sequência de passos para achar o fator de segurança (Hoek & Bray, 1981) .....	16
Figura 2.3. Carta de trabalho (Hoek & Bray, 1981).....	17
Figura 2.4. Funções X e Y da metodologia de análise de encostas da Escola de Nancy .....	19
Figura 2.5. Funções X e Y da metodologia de análise de encostas da Escola de Nancy para deslizamento planar (Sánchez, 1989).....	20
Figura 2.6. Cálculo do fator de segurança pelo método de análise de estabilidade da escola de Nancy para deslizamento circular (Sánchez, 1989).....	21
Figura 2.7. Cálculo do fator de segurança pelo método de análise de estabilidade da escola de Nancy para deslizamento planar (Sánchez, 1989).....	22
Figura 3.1. Condições para o caso de deslizamento circular (adaptada de Sánchez, 1989).....	24
Figura 3.2. Condições para o caso de deslizamento planar (adaptada de Sánchez, 1989).....	25
Figura 3.3. Condições de fluxo para análise.....	27
Figura 3.4. HSQI para deslizamento circular (adaptada de Sánchez, 1989) .....	28
Figura 3.5. HSQI para deslizamento planar (adaptada de Sánchez, 1989).....	28
Figura 3.6. Comparação entre o fator de segurança do programa <i>Geoslope</i> ® e o HSQI.....	30
Figura 3.7. Metodologia HSQI de classificação geotécnica de encostas para rodovias.....	31
Figura 3.8. Largura mínima recomendada para cada seção transversal .....	32
Figura 3.9. Definição da área de análise.....	33
Figura 3.10. Gráfico de desempenho esperado e recomendações de suporte de acordo com o índice de qualidade HSQI.....	38
Figura 4.1. Esquemas de localização da área de estudo .....	40
Figura 4.2. Detalhe de um afloramento de rochas do <i>Stock</i> de San Diego (JgSD) – km 5+200 .....	42
Figura 4.3. Afloramento de migmatitos (PRmPP) – km 12+500.....	43
Figura 4.4. Geologia do trecho em estudo da rodovia Las Palmas ( Amva, 2006) .....	44

Figura 4.5. Detalhe da topografia da via Las Palmas. Curvas a cada 2m.....	45
Figura 4.6. Muros em concreto armado no km 5+000 .....	47
Figura 4.7. Cortinas ancoradas no km 0+400.....	48
Figura 4.8. Concreto projetado no km 11+800.....	48
Figura 4.9. Drenagem superficial nos km 6+700 e km 8+100 .....	49
Figura 4.10. Controle de erosão nas encostas do km 8+500 .....	49
Figura 4.11. Encosta km 12+600.....	53
Figura 4.12. Encosta km 7+400.....	53
Figura 4.13. Encosta km 14+00.....	54
Figura 4.14. Encosta km 8+800.....	54
Figura 4.15. Gráfico de recomendações .....	57
Figura 4.16. Gráfico de recomendações e de desempenho para as encostas com muros de concreto armado ou gaviões.....	58
Figura 4.17. Gráfico de recomendações e de desempenho para as encostas com cortinas ancoradas e concreto projetado .....	59
Figura 4.18. Gráfico de recomendações e de desempenho para as encostas com drenagem subsuperficial e filtros horizontais .....	59
Figura 4.19. Gráfico de recomendações e de desempenho para as encostas com drenagem superficial .....	60
Figura 5.1. Localização da estrada La Pintada – La Felisa .....	64
Figura 5.2. Encosta E1 .....	66
Figura 5.3. Análise estereográfica da encosta. ....	67
Figura 5.4. Geometria da encosta E1 .....	67
Figura 5.5. Cálculo do HSQI para a encosta E1 .....	69
Figura 5.6. Gráfico de recomendações .....	70
Figura 5.7. Encosta E4 no km 31+100 .....	71
Figura 5.8. Encosta E5 no km 30+800 .....	72
Figura 5.9. Encosta E7 no km 30+300 .....	72

Figura 5.10. Encosta E8 no km 30+100 .....	73
Figura 5.11. Encosta E9 no km 29+800 .....	73
Figura 5.12. Encosta E11 no km 28+600 .....	74
Figura 5.13. Encosta E13 no km 28+300 .....	74
Figura 5.14. Zoneamento da estrada La Pintada–La Felisa.....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

A	Ângulo entre as juntas e a cara do talude
Amva	Área metropolitana do vale de Aburrá
B	Largura da calçada
c	Coesão do material
D	Elementos deflagradores para cálculo da suscetibilidade na metodologia Mora-Vharson-Mora
Dd	Distância de análise encosta abaixo
Dll	Elemento deflagrador por chuva na metodologia Mora-Vharson-Mora
Ds	Elemento deflagrador por sismos na metodologia Mora-Vharson-Mora
Du	Distância de análise encosta acima
Dw	Distância de análise encosta acima até a planície que representa uma zona úmida
E1	Encosta 1
E2	Encosta 2
E3	Encosta 3
E4	Encosta 4
E5	Encosta 5
E6	Encosta 6
E7	Encosta 7

E8	Encosta 8
E9	Encosta 9
E10	Encosta 10
E11	Encosta 11
E12	Encosta 12
E13	Encosta 13
EP	Elementos passivos para cálculo da suscetibilidade na metodologia Mora-Vharson-Mora
F1	Fator para calcular o SMR que depende do paralelismo entre as juntas
F2	Fator para calcular o SMR que depende do ângulo de mergulho do talude
F3	Fator para calcular o SMR que depende da relação entre o ângulo de mergulho do talude e das juntas
F4	Fator para calcular o SMR que depende do método de escavação
FC	Fator de correção para a altura
FI, FII, FIII, FIV, Fpre I	Fluxo de lammas e/ou detritos
FN	Casos falsos negativos
FP	Casos falsos positivos
FS	Fator de segurança
GSI	<i>Geotechnical Strength Index</i>

H	Altura da encosta
Hc	Altura da encosta corrigida
Hs	Grau de suscetibilidade na metodologia Mora-Vharson-Mora
HSQI	<i>Hillslope Quality Index</i> (Índice de Qualidade de Encosta)
Hw	Altura estabilizada do lençol freático
i	Inclinação da face da encosta ou talude
IDEAM	<i>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales</i>
JdSD	<i>Stock</i> de San Diego
KuM	Dunitos de Medellín
Mo	Magnitude do momento sísmico
NV	Não valor
PC	Ponto de controle
PRaM	Anfibolitos de Medellín
PRmPP	Migmatitos de Puente Peláez
Q	Número Q de Barton
QI e QII	Depósitos antrópicos
Qal	Depósitos aluviais
Qat	Depósitos aluviotorrenciais
Qd	Depósitos de deslizamento
RHRSm	<i>Rock Hazard Rating System modified</i>
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>

RMRB	<i>Rock Mass Rating</i> de Bieniawski
ROC	<i>Receiver operating characteristics</i>
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
Sh	Suscetibilidade devida à umidade do terreno na metodologia Mora-Vharson-Mora
Si	Suscetibilidade litológica na metodologia Mora-Vharson-Mora
SMR	<i>Slope Mass Rating</i>
Sp	Suscetibilidade devida à declividade do terreno na metodologia Mora-Vharson-Mora
SQI	<i>Slope Quality Index</i>
SSR	<i>Slope Stability Rating</i>
TN	Casos verdadeiros negativos
TP	Casos verdadeiros positivos
Wi	Peso dos valores da classificação dos fatores do SQI
X	Função X na metodologia de Nancy
Xi	Atribuição a cada fator do SQI
Y	Função Y na metodologia de Nancy
Zo	Profundidade das trincas de tração
$\beta$	Ângulo de mergulho aparente da família de descontinuidades principal
$\beta_j$	Ângulo de mergulho das juntas
$\gamma$	Peso volumétrico do solo

$\sigma_c$	Desvio padrão da coesão
$\sigma_\varphi$	Desvio padrão do atrito
$\theta$	Ângulo de inclinação da encosta
$\varphi$	Ângulo de atrito do material

## **1. INTRODUÇÃO**

Em projetos de estradas em montanha, é importante definir a inclinação apropriada para os cortes e aterros, considerando as características geológicas dos materiais encontrados nos taludes, o volume de terra a ser removido e os custos – tendo este último elemento um grande peso na tomada de decisões com respeito à viabilidade dos projetos. Esses projetos muitas vezes não levam em conta os custos gerados pelas consequências do risco do deslizamento devido aos fenômenos de instabilidade de encostas.

O processo de planejamento de projetos de estradas deve passar necessariamente por uma etapa inicial de reconhecimento geológico geotécnico, com a finalidade de identificar trechos com estabilidade crítica ou dificuldades geotécnicas especiais. Essa avaliação inicial do terreno é fundamental para definir as etapas seguintes de exploração geotécnica detalhada, ensaios de laboratório, planejamento da licitação, prazos e custos.

Em muitos casos, o geólogo não consegue identificar todos os trechos críticos ou não consegue classificar apropriadamente o seu grau de criticidade e, dessa forma, não entrega à equipe de projeto dados relevantes para as etapas seguintes. É preciso introduzir os conceitos de risco nos projetos de estradas, mediante uma metodologia simples de classificação de encostas que permita aos planejadores desses projetos estarem mais cientes das zonas vulneráveis e de maior risco de perdas econômicas e de vidas humanas, além de terem ideia dos custos das principais obras de estabilização e prevenção.

### **1.1. JUSTIFICATIVA**

Em zonas montanhosas, é comum a ocorrência de deslizamentos de terra e de rochas que produzem altas perdas econômicas, impactos ambientais, lesões e mortes de pessoas. Os deslizamentos produzidos nas estradas são devidos à falta de planejamento adequado, que permita definir e aplicar as medidas de tratamento de encostas necessárias para garantir a sua estabilidade.

Na área metropolitana de Medellín, Colômbia, os movimentos em massa representam 35% das ocorrências de desastres e apresentam os maiores danos, com 74% das mortes e 33% dos danos a edificações (Aristizábal & Gómez, 2007).

As estradas são projetos muito afetados por deslizamentos. Em decorrência disso, são geradas muitas perdas econômicas, tanto pela recuperação da infraestrutura como pelas perdas indiretas resultantes da interrupção da conectividade das estradas.

Na Colômbia, particularmente no departamento de Antioquia e no vale de Aburrá, as rodovias que ligam a região ao resto do país têm apresentado sérios problemas de instabilidade de encostas, causadoras de problemas como perda de conectividade, lesões humanas, perdas materiais e de vidas. Esses problemas podem ser atribuídos a fatores naturais, como a própria topografia da região, as condições geológicas e climáticas. Porém, também se devem à falta de planejamento do risco de deslizamento das encostas nesses projetos.

Atualmente, não existem metodologias de classificação e zoneamento que permitam aos planejadores saber nas etapas preliminares quais são os setores mais suscetíveis a deslizamento ao longo das rodovias. Esta pesquisa irá contribuir para o desenvolvimento de um método que permita, de forma sistemática, avaliar a qualidade das encostas nas etapas preliminares dos projetos de estradas mediante um índice (*Hillslope Quality Index* – HSQI) e propor recomendações de obras de prevenção e tratamento, dependendo da qualidade das encostas.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e avaliar uma metodologia de classificação do comportamento geotécnico de encostas em projetos de rodovias em regiões montanhosas baseada em um indicador de qualidade das encostas, chamado *Hillslope Quality Index* (HSQI), que permite reconhecer as possíveis zonas de ameaça de deslizamento em toda a extensão da estrada, segmentar o projeto segundo o comportamento esperado do ponto de vista da estabilidade de encostas e fornecer recomendações de obras de tratamento para os taludes.

O *Hillslope Quality Index* (HSQI) foi desenvolvido seguindo a hipótese de aplicar uma metodologia de análise de estabilidade de taludes às encostas.

Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica com o intuito de estabelecer um estado da arte dos sistemas de classificação de estradas baseados na ameaça de deslizamento.

Posteriormente, foi desenvolvida a metodologia completa para ser aplicada pelos planejadores de vias nos primeiros estágios dos projetos de estradas em regiões tropicais e montanhosas.

Depois, foram calibrados, validados e avaliados o comportamento e a coerência do sistema de classificação proposto mediante medições de taludes da rodovia Las Palmas, na cidade de Medellín, com a ajuda de um inventário de deslizamentos de taludes feito nessa cidade (Muñoz & Martínez, 2013), e de um trabalho de campo realizado em janeiro de 2015.

Foram propostas diferentes medidas de tratamento dos taludes, dependendo do grau de criticidade obtido da classificação, tendo em conta as obras de estabilização, drenagem e proteção superficial observadas nas encostas da estrada Las Palmas.

Finalmente, foi feita uma análise estatística da variação do índice HSQI, dependendo da variabilidade das propriedades geotécnicas, e oferecido um exemplo da aplicação da metodologia em uma estrada nacional colombiana.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, cujo conteúdo é resumido a seguir:

No Capítulo 1, há uma introdução ao tópico da pesquisa, aos objetivos e ao escopo da dissertação.

No Capítulo 2, são apresentados uma revisão bibliográfica para estabelecer o estado da arte dos diferentes sistemas de classificação para taludes rochosos individuais e os sistemas aplicados a áreas; o método de avaliação de sistemas de classificação *Receiver Operating characteristics* (ROC – Fawcett, 2006); e metodologias simples de estabilidade de encostas que servem de base para o método HSQI.

No Capítulo 3, são mostrados a metodologia HSQI; os passos para a sua aplicação; o método para zoneamento da estrada e o cálculo do índice de qualidade HSQI; e o modo de utilização do gráfico de recomendações de tratamento das estradas.

No Capítulo 4, são feitas a avaliação da metodologia utilizada na estrada Las Palmas, localizada na cidade de Medellín; a avaliação do sistema de classificação, com os resultados conseguidos; a descrição das obras de tratamento e estabilização encontradas em campo; e os gráficos de desempenho e de recomendações baseados nas obras.

No Capítulo 5, é realizada uma análise estatística, com estimativas pontuais do índice de qualidade HSQI dependendo da variabilidade dos parâmetros geotécnicos, calculado com base nos dados recolhidos no trabalho de campo, e também é apresentado um exemplo da aplicação da metodologia HSQI, feita em uma estrada nacional da Colômbia.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões obtidas a partir da aplicação da metodologia e feitas recomendações e sugestões para próximas pesquisas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como foi dito no capítulo anterior, é muito importante zonar e classificar as estradas segundo a suscetibilidade a deslizamento das suas encostas. Para isso, é relevante analisar a estabilidade individual de todas as encostas objeto de intervenção por parte do projeto, seja por obras de corte ou aterro.

Neste capítulo, são apresentados os principais sistemas de classificação geomecânica de taludes, assim como vários sistemas de avaliação da suscetibilidade das encostas a deslizamento em grandes áreas. São expostas também a análise *Receiver Operating Characteristics* (ROC), que permite avaliar os sistemas de classificação segundo o seu comportamento, e duas metodologias simples de análise de estabilidade de taludes, que servem de base para propor um método de análise da qualidade das encostas que fornece o índice de qualidade HSQI.

### 2.1. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE TALUDES

Existem vários sistemas de classificação geomecânica de taludes rochosos, como o *Slope Mass Rating* (SMR – M. R. Romana, 1993), o *Rock Mass Rating* (RMR), o Q de Braton e o índice GSI (Marinos *et al.*, 2005), que são muito utilizados na engenharia geotécnica e serviram de base para propor novos métodos de análise de estabilidade, como o *Slope Stability Rating* (SSR) – que adiciona o efeito da força sísmica (Taherynia *et al.*, 2014); sistemas empíricos como o *Slope Quality Index* (SQI – Pinheiro *et al.*, 2015); métodos que levam em conta a suscetibilidade a deslizamento das encostas – como a metodologia Mora-Vharson-Mora (Mora, 2004), proposta inicialmente, na Costa Rica, por Mora *et al.* (1992); o método de análise de estabilidade de taludes para projetos viários (Barquero, 2012); e a metodologia simplificada de avaliação da vulnerabilidade de aterros em estradas de montanha (Calderón & Monge, 2007).

A maioria das metodologias anteriores foi desenvolvida para análise de taludes individuais, não de zonas ou setores de estradas. A metodologia Mora-Vharson-Mora é aplicada para avaliar a suscetibilidade a deslizamento em grandes áreas, mas não em projetos lineares como rodovias. A seguir, são detalhados os sistemas mais representativos.

### 2.1.1. SLOPE MASS RATING (SMR)

O *Slope Mass Rating* (SMR) é uma classificação geomecânica, baseada no *Rock Mass Rating* (RMR – Bieniawski, 1993), aplicada a taludes rochosos (Romana, 1993; Romana *et al.*, 2003). Na Eq. 2.1, é mostrado o cálculo do SMR:

$$SMR = RMR_B + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (2.1)$$

Onde o  $RMR_B$  (*Rock Mass Rating*) é calculado com a proposta de Bieniawski, de 1979, atribuindo pesos a cinco parâmetros: resistência da rocha, *Rock Quality Designation* (RQD), espaçamento das descontinuidades, fluxo de água através das descontinuidades e relação de poropressão. Na Tabela 1 do Anexo 1, é mostrado o cálculo do RMR.

O parâmetro  $F_1$  depende do ângulo entre as juntas e a face do talude chamado A. Este parâmetro varia de 1,00 a 0,15 e é obtido com a Eq. 2.2:

$$F_1 = (1 - \sin A)^2 \quad (2.2)$$

O parâmetro  $F_2$  refere-se ao ângulo de mergulho ( $\beta_j$ ) das juntas na ruptura planar. Este fator varia de 1,00 a 0,15 e é obtido com a Eq. 2.3:

$$F_2 = tg^2(\beta_j) \quad (2.3)$$

O parâmetro  $F_3$  reflete a relação entre os mergulhos de talude e as juntas, como na metodologia de Bieniawski.

O parâmetro  $F_4$  é um fator empírico de ajuste dependendo do método de escavação.

Na Tabela 2 do Anexo 1, são mostrados os valores para os parâmetros  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  e  $F_4$ .

Esta metodologia foi validada por diferentes autores e em diferentes países, e é utilizada como classificador geomecânico dos taludes, tomando os fatores  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  como parâmetros de risco e como método alternativo de avaliação da estabilidade dos taludes rochosos.

Os autores concordam que esta metodologia é conservadora e que os modos de ruptura estimados realmente ocorrem. O SMR não leva em conta o peso do talude, acarretando, portanto, algumas dificuldades para avaliar taludes em solos ou rochas muito intemperizadas, que apresentam superfície de ruptura circular.

Entre as metodologias desenvolvidas com base no SMR, existem um método gráfico do SMR que permite obter facilmente os parâmetros de correção do modelo para muitos taludes, a exemplo de obras lineares como estradas ou taludes em grandes escavações (Tomás *et al.*, 2012), e o *Fuzzy Slope Mass Rating* (Daftaribesheli *et al.*, 2011).

### 2.1.2. SLOPE QUALITY INDEX (SQI)

O *Slope Quality Index* ou SQI é baseado no sistema de classificação de encostas rochosas desenvolvido por Lui & Cheng (2007), que considera pesos para três fatores dependendo da sua importância. O SQI varia de 1 a 5 para diferentes níveis de risco, como apresentado na Tabela 2.1 (Pinheiro *et al.*, 2015):

Tabela 2.1. Classificação qualitativa e quantitativa para o SQI (Pinheiro *et al.*, 2015)

SQI	Estado do talude	Nível de risco
1 - 1,4	Muito bom	Muito baixo
1,5 - 2,4	Bom	Baixo
2,5 - 3,4	Médio	Médio
3,4 - 4,2	Ruim	Alto
4,3 - 5	Muito ruim	Muito alto

O SQI pode ser usado para avaliar o mapa de ameaça e para tomar decisões quanto aos planos de intervenção de médio e longo prazo. Também é baseado no *Rock Hazard Rating System Modified* (RHRSm – Budetta, 2004), que é usado para avaliar o potencial de queda de blocos.

O principal objetivo do sistema SQI é o cálculo de um índice baseado em nove fatores, direta ou indiretamente relacionados com a estabilidade dos taludes. Para obter o valor final, é preciso atribuir pesos a cada um dos fatores.

Para o cálculo do SQI, é usada a Eq. 2.4:

$$SQI = \sum_{i=1}^n (W_i \times X_i) \quad (2.4)$$

Onde  $W_i$  é o peso de cada um dos fatores, variando de 0 a 1, e  $X_i$  é o valor da classificação atribuída a cada fator. Cada fator é calculado com a Eq. 2.5:

$$X_i = \sum_{i=1}^n (W'_i \times X'_i) \quad (2.5)$$

Onde  $W'_i$  é o peso atribuído a cada parâmetro e  $X'_i$  é o valor obtido para cada parâmetro, variando de 1 a 5.

As nove categorias são as seguintes:

- Geometria: altura e inclinação do talude.
- Geologia: sistemas de classificação empíricos (RMR, SMR ou Q). Tipo de formação e risco de queda de blocos.
- Sistema de drenagem: existência e conservação dos sistemas de drenagem superficiais e subsuperficiais.
- Inspeções: manutenção e conservação das obras realizadas.
- Monitoramento: resultados dos sistemas de monitoramento (inclinômetros, piezômetros, etc.).
- Arredores: existência de sobrecarga (prédios, etc.) e possíveis vibrações (obras, etc.).

- Histórico: acidentes ocorridos nos taludes e intervenções. Inventário de deslizamentos ocorridos anteriormente.
- Proteção: proteção superficial e cobertura vegetal. Se existe e as suas condições atuais.
- Ambiente/tráfego: zona sísmica, precipitação e níveis de tráfego.

O sistema não propõe obras de estabilização ou mitigação da suscetibilidade a deslizamento das encostas. Simplesmente avalia as existentes. As Tabelas encontram-se no Anexo 2.

O SQI foi aplicado a um grupo de taludes em rocha na rodovia Beira Alta, no litoral leste de Portugal – geologia composta, principalmente, por formações de xistos –, e foi comparado com a avaliação de um grupo de especialistas. Encontraram-se apenas pequenas diferenças entre o observado e o encontrado em campo, que demonstram que a metodologia do SQI fornece uma visão real do comportamento dos taludes e é possível aplicá-la na fase de viabilidade dos projetos de estradas para conhecer a suscetibilidade a deslizamento das encostas.

### 2.1.3. METODOLOGIA MORA-VHARSON-MORA

A metodologia Mora-Vharson-Mora permite obter um zoneamento da suscetibilidade do terreno a deslizamento mediante a combinação da avaliação e do peso de diferentes indicadores geomorfológicos e dinâmicos. É uma metodologia simples de usar em plataformas SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e ajuda a identificar áreas críticas para orientar melhor os recursos dos estudos geotécnicos (Mora C & Vahrson, 1994).

A suscetibilidade é encontrada com a Eq. 2.6:

$$H_s = EP \times D \tag{2.6}$$

Onde  $H_s$  é o grau de suscetibilidade,  $EP$  são os elementos passivos e  $D$  são os elementos deflagradores.

Os elementos passivos são encontrados com a Eq. 2.7:

$$EP = S_i \times S_h \times S_p$$

(2.7)

Onde  $S_i$  é o parâmetro de suscetibilidade litológica,  $S_h$  é o parâmetro de umidade do terreno e  $S_p$  é o parâmetro de suscetibilidade devida à declividade.

Os elementos deflagradores são encontrados com a Eq. 2.8:

$$D = D_s \times D_{ll} \quad (2.8)$$

Onde  $D_s$  é o elemento deflagrador por sismo e  $D_{ll}$  é o elemento deflagrador por chuva.

Na Tabela 2.2, são apresentadas as categorias do SQI, de acordo com a sua suscetibilidade e as suas características:

Tabela 2.2. Categorias da metodologia Mora-Vharson-Mora (Mora, 2013b)

Categoria	Suscetibilidade	Características
I	Muito baixa	Taludes estáveis. Uso de solo: edifícios prioritários.
II	Baixa	Medidas corretivas menores. Uso urbano: zonas de densidade alta.
III	Moderada	Projeto detalhado dos sistemas de estabilização. Uso urbano: zonas de densidade baixa.
IV	Alta	Probabilidade de deslizamento menor que 50% com sismos de magnitude média e chuva alta. Projetos detalhados de estabilização, com possível uso urbano de baixa densidade.
V	Muito alta	Probabilidade de deslizamento maior que 50% com sismos de magnitude média e chuva alta. Proibido o uso urbano.

A aplicação da metodologia foi realizada em algumas rodovias da região de São José, na província de São José, na Costa Rica, onde a geologia é composta principalmente de depósitos vulcânicos. Os resultados mostram que essa metodologia é muito conservadora, pois combina os efeitos simultâneos da força sísmica e de chuvas de grande intensidade para avaliar a suscetibilidade a deslizamento.

A metodologia não propõe nenhum tipo de intervenção para melhoria das condições do terreno ou mitigação, pois foi concebida para avaliar a suscetibilidade das áreas, sem gerar recomendações para obras de tratamento.

#### **2.1.4. METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE BASEADA NO ÂNGULO CRÍTICO**

Esta metodologia, proposta por Monge & Mora (2008), pretende encontrar as zonas mais suscetíveis a instabilidade em rodovias avaliando, primeiro, os níveis prováveis de ameaça, mediante o ângulo crítico, e verificando, depois, a suscetibilidade, mediante a relação com a altura dos taludes de corte e de aterro.

O ângulo crítico é definido como o valor médio do ângulo de inclinação nas zonas deslizadas e é uma propriedade específica do solo, encontrado por meio do modelo de elevação digital ou de mapas em que possam ser observadas as inclinações nas zonas onde ocorreram movimentos em massa.

O valor do ângulo crítico é definido mediante a análise estatística das inclinações das encostas onde ocorreram deslizamentos dentro de zonas geomorfologicamente independentes, ou seja, com características homogêneas. No trabalho de Monge & Mora, essa distância foi determinada como 200m de estrada, mas ela varia conforme o local de aplicação da metodologia.

Na Tabela 2.3, são mostrados os critérios para classificar o nível de ameaça para os diferentes ângulos críticos.

Tabela 2.3. Critérios para classificação da ameaça

Ângulo de inclinação $\theta$ (°)	Nível de ameaça
$\theta \leq 10^\circ$	Muito baixa
$10^\circ > \theta \leq 20^\circ$	Baixa
$20^\circ > \theta \leq 30^\circ$	Moderada
$30^\circ > \theta \leq 40^\circ$	Alta
$\theta > 40^\circ$	Muito alta

O fator de suscetibilidade que se considera mais importante nessa metodologia é a altura dos taludes de corte e de aterro. Na Tabela 2.4, é mostrada a combinação do ângulo de inclinação crítico e da altura dos taludes para definir o nível de suscetibilidade geotécnica da zona.

Tabela 2.4. Critérios para classificação da suscetibilidade (modificada de Monge & Mora, 2008)

Nível de ameaça	Ângulo de inclinação $\theta$ ( $^{\circ}$ )	Altura do talude H (m)	Nível de suscetibilidade
Muito baixa	$\theta \leq 10^{\circ}$	$H < 10\text{m}$	Muito baixa
		$H \geq 10\text{m}$	Baixa
Baixa	$10^{\circ} > \theta \leq 20^{\circ}$	$H < 5\text{m}$	Muito baixa
		$5\text{m} \geq H < 10\text{m}$	Baixa
		$H \geq 10\text{m}$	Moderada
Moderada	$20^{\circ} > \theta \leq 30^{\circ}$	$H < 5\text{m}$	Baixa
		$5\text{m} \geq H < 10\text{m}$	Moderada
		$H \geq 10\text{m}$	Alta
Alta	$30^{\circ} > \theta \leq 40^{\circ}$	$H < 5\text{m}$	Moderada
		$5\text{m} \geq H < 10\text{m}$	Alta
		$H \geq 10\text{m}$	Muito alta
Muito alta	$\theta > 40^{\circ}$	$H < 5\text{m}$	Alta
		$H \geq 5\text{m}$	Muito alta

Esta metodologia foi aplicada em várias rodovias do vale central da Costa Rica, zona com geologia composta principalmente por depósitos vulcânicos, que geram solos residuais de grande espessura e com propriedades geotécnicas muito baixas, o que ocasiona uma alta suscetibilidade a escorregamentos na maior parte das estradas.

Pode-se atribuir também essa alta suscetibilidade a deslizamento das encostas às características geométricas das estradas e dos taludes de corte e aterro, pois as estradas têm uma largura de calçada e raios de curvatura muito reduzidos e drenagem deficiente, devido à falta de condições técnicas e econômicas à época da sua construção. Os traçados seguem a própria topografia da montanha e grandes cortes e aterros se fizeram necessários, o que torna os taludes muito altos.

Esta metodologia não propõe nenhum tipo de obras de tratamento. Ela só avalia a suscetibilidade das encostas e as condições físicas e geométricas da estrada.

## 2.2. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO – ANÁLISE ROC

A análise *Receiver Operating Characteristics* (ROC) permite visualizar, organizar e selecionar classificadores com base no seu comportamento e tem sido utilizada em diferentes áreas para representar o equilíbrio entre as taxas de acurácia e o falso alarme (Fawcett, 2006).

Na análise ROC, são consideradas duas classes reais – denominadas verdadeiras (V) e falsas (F) – e duas classes estimadas pela metodologia – positiva (P) e negativa (N) –, que podem se relacionar de quatro formas diferentes, apresentadas na Tabela 2.5:

Tabela 2.5. Análise ROC

		VALOR OBSERVADO	
		VERDADEIROS	FALSOS
VALOR ESTIMADO	POSITIVOS	Acertos (TP)	Desacertos (FP)
	NEGATIVOS	Desacertos (FN)	Acertos (TN)

Na Tabela 2.5, é observado:

- Verdadeiro positivo (TP): valor de classe real classificado, corretamente, como positivo.
- Verdadeiro negativo (TN): valor de classe real classificado, corretamente, como negativo.
- Falso positivo (FP): valor de classe real estimado, incorretamente, como positivo.
- Falso negativo (FN): valor da classe real estimado, incorretamente, como negativo.

A taxa de verdadeiros positivos é denominada taxa de estimação e é a relação entre os valores de classes classificados corretamente como positivos e a totalidade das classes positivas existentes.

Na Eq. 2.9, é mostrada a taxa de estimação:

$$\text{Taxa de estimação (TP rate)} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2.9)$$

A taxa de falsos negativos ou falso alarme é a relação entre os valores falsos estimados incorretamente como positivos e a totalidade dos negativos. Na Eq. 2.10, é mostrado o falso alarme:

$$\text{Falso alarme (FP rate)} = \frac{FP}{FP+TN} \quad (2.10)$$

A taxa sensibilidade ou precisão negativa é a relação dos valores negativos estimados corretamente, entre todos os valores negativos. Na Eq. 2.11, é mostrada a sensibilidade:

$$\text{sensibilidade (TP rate)} = \frac{TN}{FP+TN} \quad (2.11)$$

A análise com o sistema ROC é usada para avaliar a metodologia HSQI devido à sua facilidade e também devido à possibilidade de comparação com outros modelos de análise de ameaça como o SHALLSTAB (Montgomery & Dietrich, 1994) e o SHIA-LANDSLIDE (Aristizábal, 2013), que são duas metodologias para avaliar a suscetibilidade ao deslizamento de encostas.

## **2.3. METODOLOGIAS SIMPLES DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS**

A seguir, são apresentadas diferentes metodologias simples de análise de estabilidade de taludes, que serviram como base para a proposta do HSQI.

### **2.3.1. HOEK E BRAY**

O método de análise de estabilidade de taludes desenvolvido por Hoek & Bray (1981) apresenta uma série de cartas para calcular o fator de segurança de taludes compostos por materiais fracos, como rochas altamente intemperizadas ou solos nos quais a ruptura acontece ao longo de uma superfície circular.

Os gráficos foram desenvolvidos por meio de milhares de análises de estabilidade com o procedimento de equilíbrio limite para superfície de ruptura circular e aplicados a uma grande variedade de geometrias de taludes e condições de água no solo.

Os dados importantes para aplicar este método de análise são a geometria do talude – caracterizada pela altura  $H$  e a inclinação da face – e as propriedades mecânicas – coesão  $c$ , ângulo de atrito  $\phi$  e peso volumétrico do solo  $\gamma$ . Existem cinco gráficos diferentes, dependendo das condições do lençol freático, como é mostrado na Figura 2.1.

O fator de segurança é obtido da forma mostrada na Figura 2.2. O primeiro passo é definir as condições do lençol freático para escolher a carta. Depois, é necessário achar o parâmetro adimensional  $c/(\gamma H \tan\phi)$  e localizar esse valor no arco superior. Desse ponto, traça-se uma perpendicular a esse arco, chegando ao arco inferior, até achar o FS por qualquer um dos parâmetros adimensionais  $\tan\phi$  ou  $c/(\gamma H)$ .

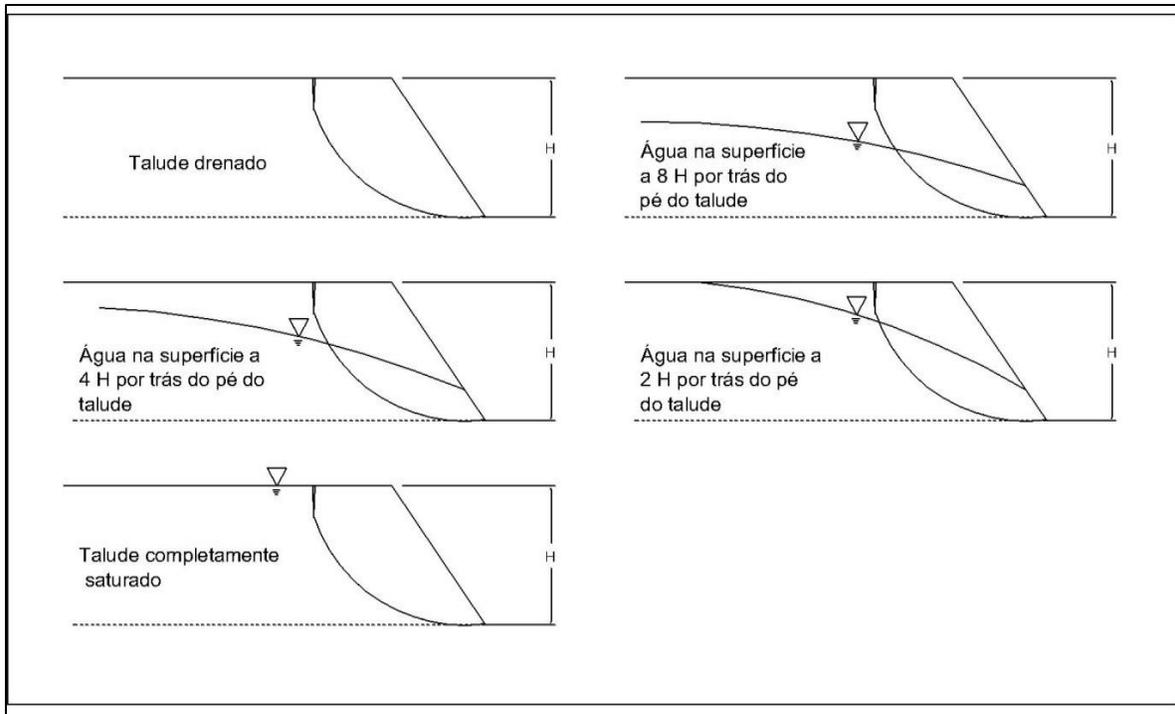


Figura 2.1. Condições do lençol freático para análise de taludes pelas cartas de Hoek & Bray

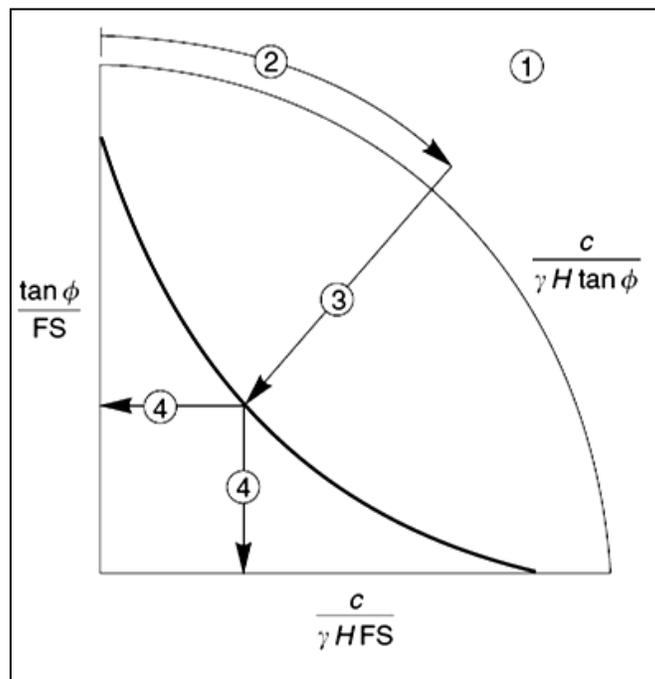


Figura 2.2. Sequência de passos para achar o fator de segurança (Hoek & Bray, 1981)

Na Figura 2.1 se mostra o gráfico de trabalho da metodologia Hoek & Bray para uma condição de lençol freático.

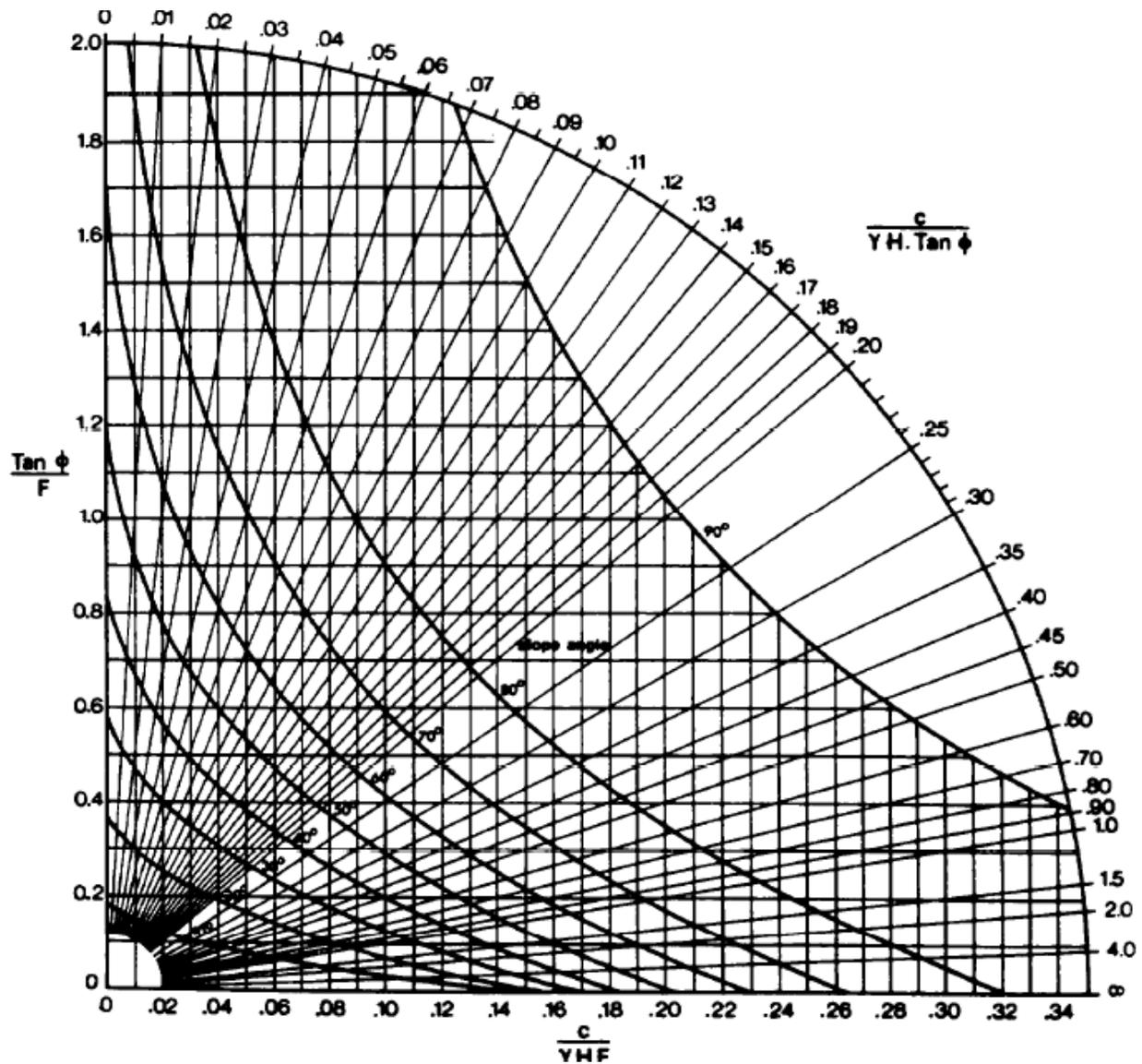


Figura 2.3. Carta de trabalho (Hoek & Bray, 1981)

### 2.3.2. ESCOLA DE NANCY

O método proposto pela Escola de Nancy, na França, é recomendado por Sánchez (1989) devido à sua simplicidade e praticidade para o cálculo do fator de segurança quanto a potenciais

deslizamentos, considerando seis condições de geometria e lençol freático – aplicadas tanto em deslizamentos com ruptura circular como com ruptura planar.

Esta metodologia requer conhecimento dos seguintes parâmetros geométricos e geotécnicos: altura (H) e inclinação (i) máxima da face do talude; altura máxima ou estabilizada do lençol freático (Hw); profundidade das trincas de tração (Zo), se existirem; forma do lençol freático (parabólico ou horizontal); peso específico ( $\gamma$ ); coesão (c); e ângulo de atrito ( $^{\circ}$ ) do material.

Para o caso de deslizamento circular, o resultado da superfície de ruptura é o menor círculo que passa entre a borda inferior livre do talude e o extremo inferior da fenda de tração (caso ela exista).

O procedimento é explicado, a seguir, com a ajuda da Figura 2.4 e da Figura 2.5.

Depois de definir os parâmetros do talude, é preciso também definir a função X (função ângulo ou inclinação do talude) e uma função Y (função do peso do talude). Para cada função, existem três casos possíveis:

#### *Função X*

- Caso A: talude drenado
- Caso C: talude com lençol freático normal
- Caso E: talude com lençol freático horizontal

#### *Função Y*

- Caso B: talude sem trincas de tração
- Caso D: talude com trinca de tração seca
- Caso F: talude com trinca de tração saturada

Cada caso tem a sua própria equação:

Infelizmente o documento bibliográfico da Ecole Des Mines A Nancy, para este método, não inclui autor, nem nome do livro ou artigo de onde foi criada, nem a dedução das equações para desenvolver o método.

As funções X e Y tem um valor máximo, no caso da função X de 60 e da função Y de 100. Portanto os valores de FS também saturam no valor máximo e 2,0.

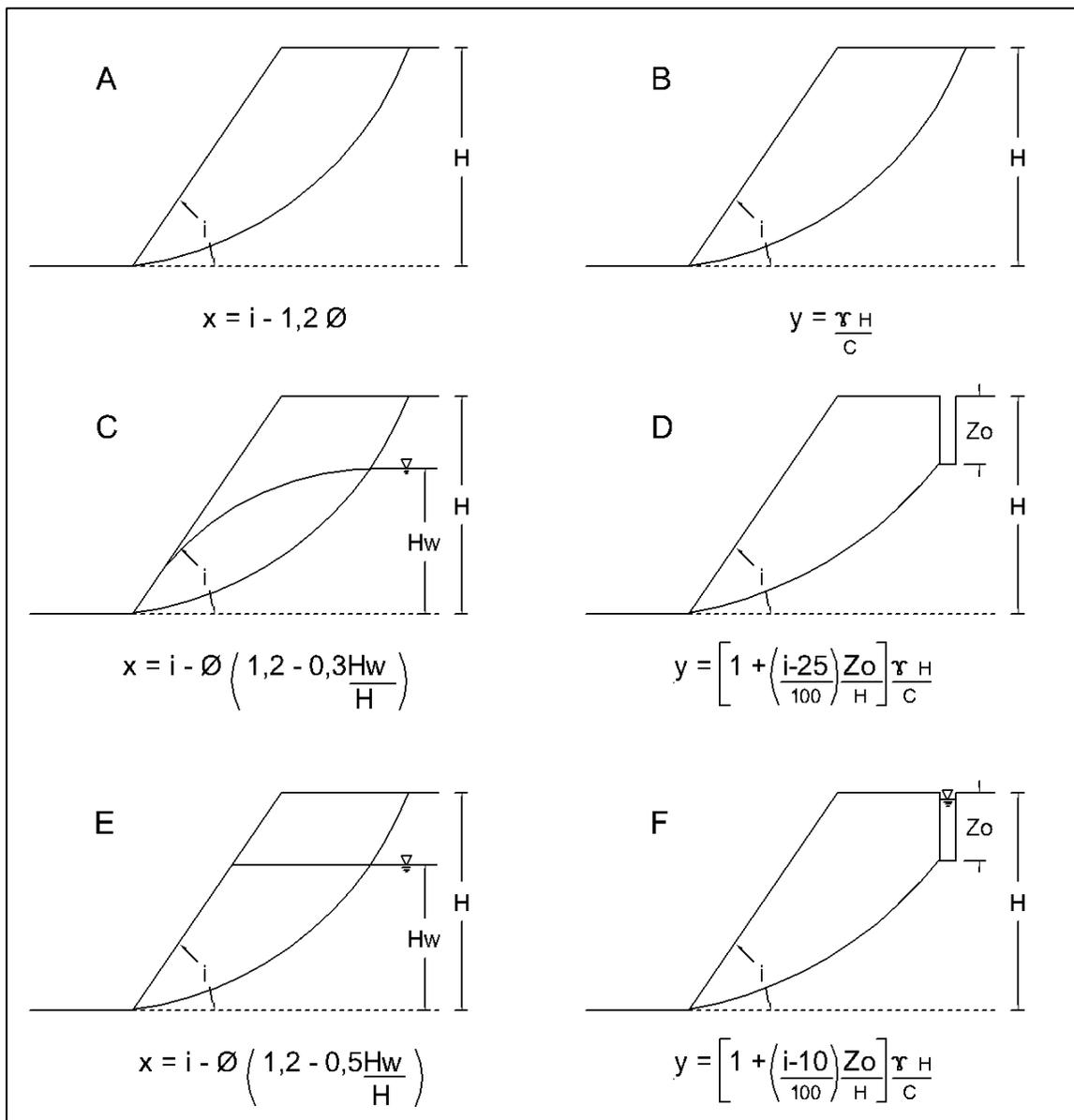


Figura 2.4. Funções X e Y da metodologia de análise de encostas da Escola de Nancy para deslizamento circular (Sánchez, 1989)

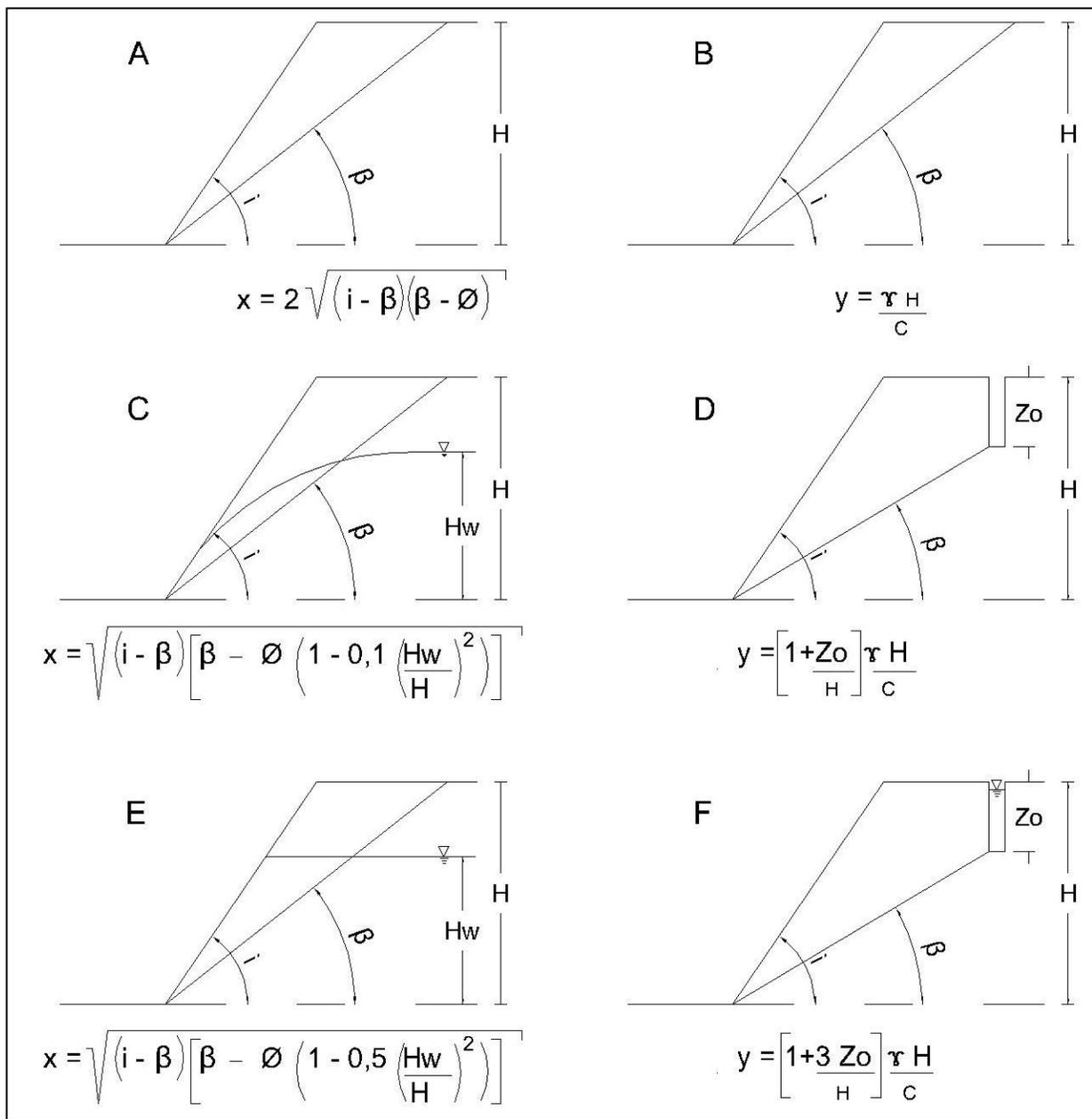


Figura 2.5. Funções X e Y da metodologia de análise de encostas da Escola de Nancy para deslizamento planar (Sánchez, 1989)

Depois de calcular os valores das funções X e Y, procede-se à avaliação do fator de segurança conforme os gráficos mostrados na Figura 2.6 e na Figura 2.7:

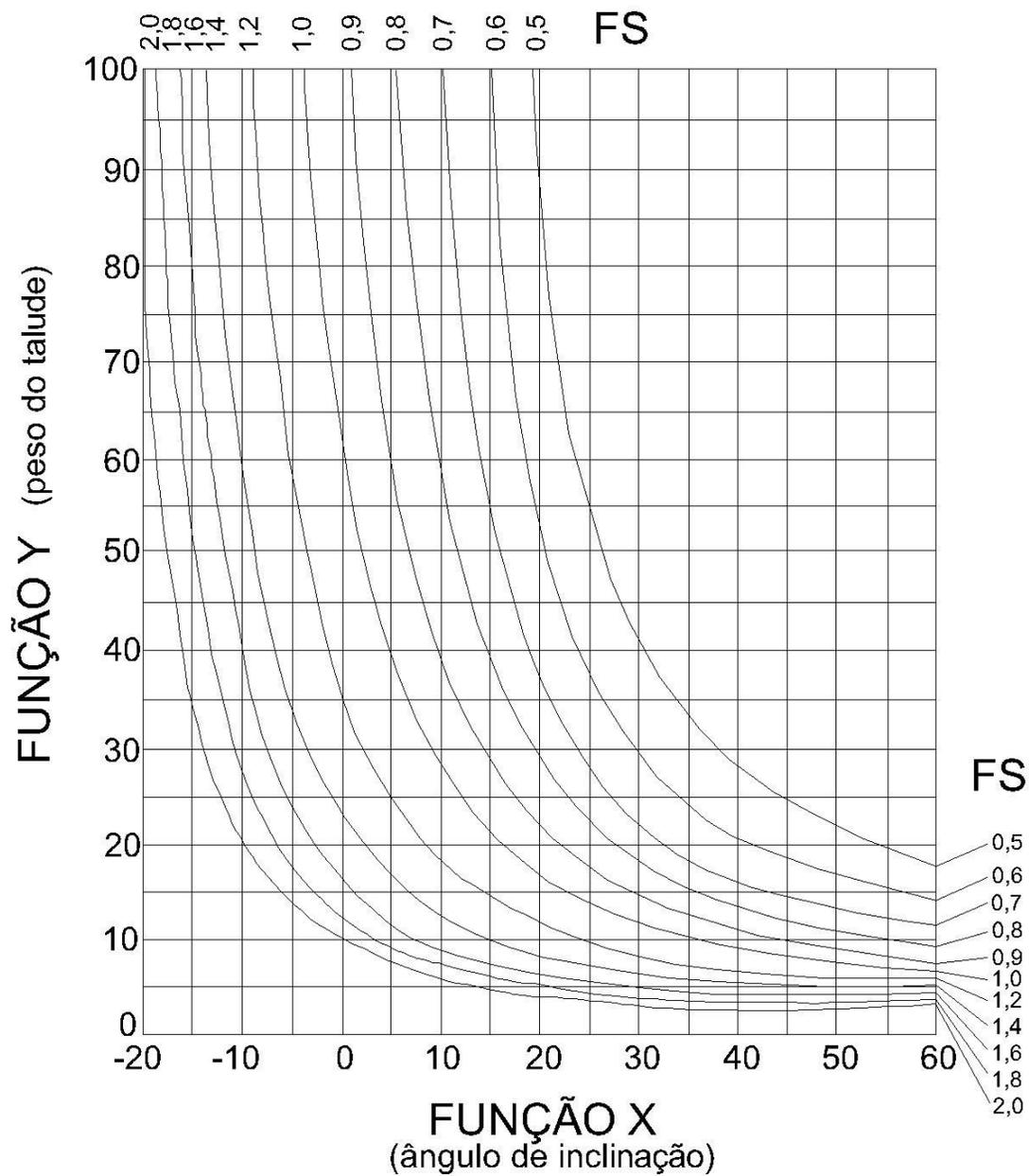


Figura 2.6. Cálculo do fator de segurança pelo método de análise de estabilidade da escola de Nancy para deslizamento circular (Sánchez, 1989)

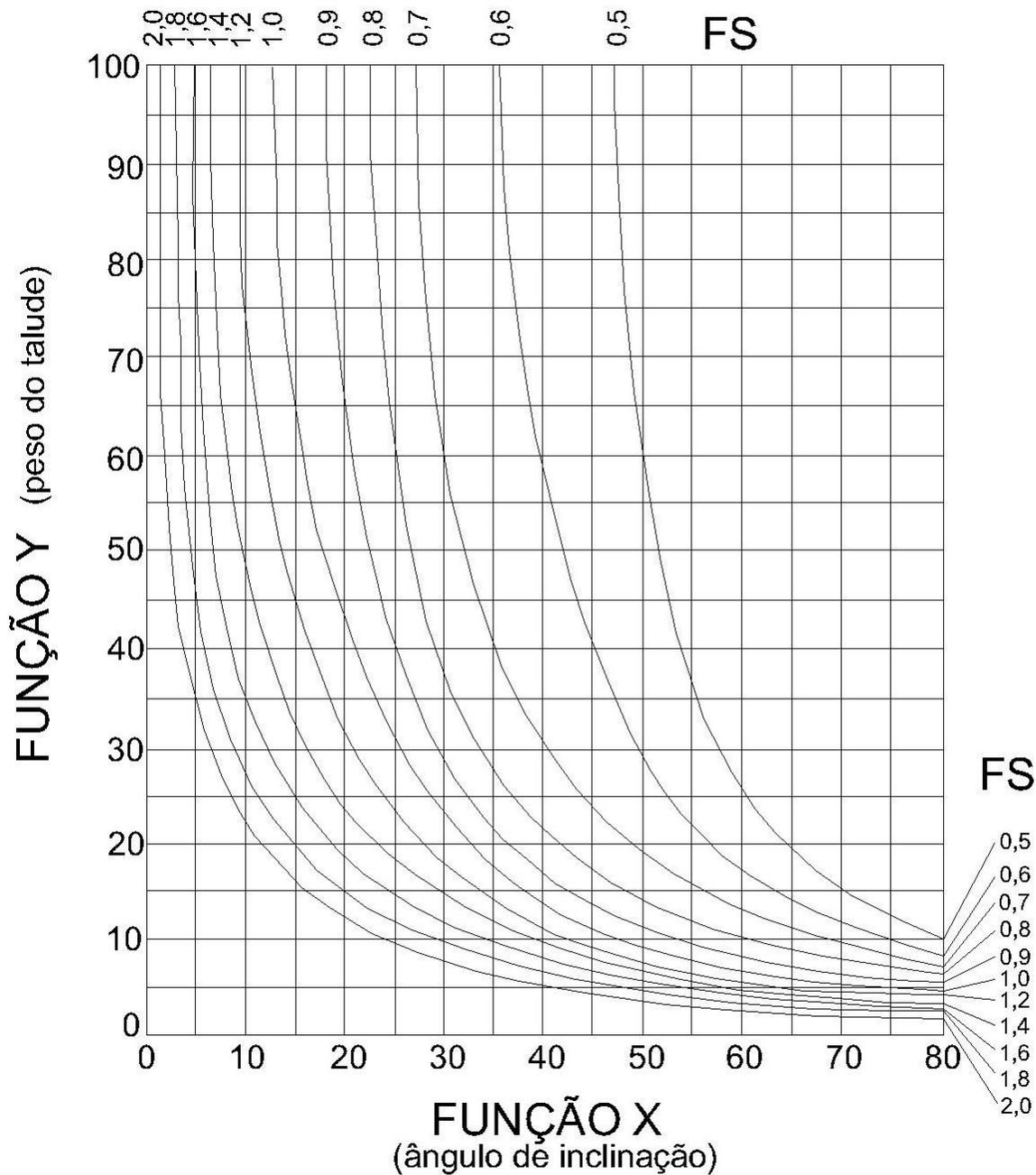


Figura 2.7. Cálculo do fator de segurança pelo método de análise de estabilidade da escola de Nancy para deslizamento planar (Sánchez, 1989)

Esta metodologia é simples e rápida para analisar a estabilidade das encostas em etapas preliminares do projeto, desde que se cumpram as hipóteses de material homogêneo e superfície de ruptura circular, no caso de solos, e superfície de ruptura planar, para rochas.

### 3. MODELO PROPOSTO E METODOLOGIA DA PESQUISA

No capítulo anterior, foi revisado o estado de conhecimento referente às metodologias de classificação geotécnica; a avaliação de sistemas de classificação mediante o sistema ROC, o qual vai ser usado para avaliar a metodologia HSQI; e alguns métodos simples de análise de estabilidade de taludes.

Neste capítulo, é apresentada a metodologia para classificação de encostas em estradas denominada *Hillslope Quality Index* (HSQI).

É importante entender que os resultados do índice de qualidade HSQI obtidos são aceitáveis apenas para uma análise preliminar da estabilidade das encostas. Eles não substituem, portanto, métodos de análise de estabilidade como o de equilíbrio limite ou o método de elementos finitos (MEF), usados em engenharia para projetos.

#### 3.1. *HILLSLOPE QUALITY INDEX* (HSQI)

O sistema de classificação HSQI utiliza como base a metodologia proposta pela Escola de Nancy para taludes em solo e em rocha (Sánchez, 1989), mas aplica uma modificação no termo fator de segurança e, no seu lugar, usa o conceito de índice de qualidade da encosta HSQI como indicativo inicial da suscetibilidade das encostas aos deslizamentos causados pela construção de cortes devido ao projeto da estrada.

Para aplicar este método, é preciso conhecer os seguintes parâmetros: altura da encosta ( $H$ ), inclinação da encosta ( $i$ ), parâmetros geotécnicos do material da encosta – como a coesão ( $c'$ ), ângulo de atrito ( $\phi'$ ) e propriedades físicas como peso específico ( $\gamma$ ) –, e a altura máxima ou estabilizada do lençol freático ( $H_w$ ).

A escolha do tipo de deslizamento (circular ou planar) é feita com base na análise geológica das encostas e deverão ser considerados também os fatores que influem na ruptura. O tipo de ruptura circular apresenta-se em encostas com materiais com propriedades geotécnicas baixas, como rochas muito fracas ou muito intemperizadas, ou solos. Nos maciços de rochas com propriedades geotécnicas muito boas, a ruptura é controlada pelas discontinuidades no maciço, gerando assim um mecanismo planar.

Dependendo do tipo de deslizamento, são calculadas duas funções, definidas como X e Y. A primeira dependente do atrito e a segunda, da coesão. Os valores dessas funções são necessários para o cálculo do índice de qualidade através de cartas. A Figura 3.1 e a Figura 3.2 mostram cada condição de encosta com deslizamento de tipo circular e planar.

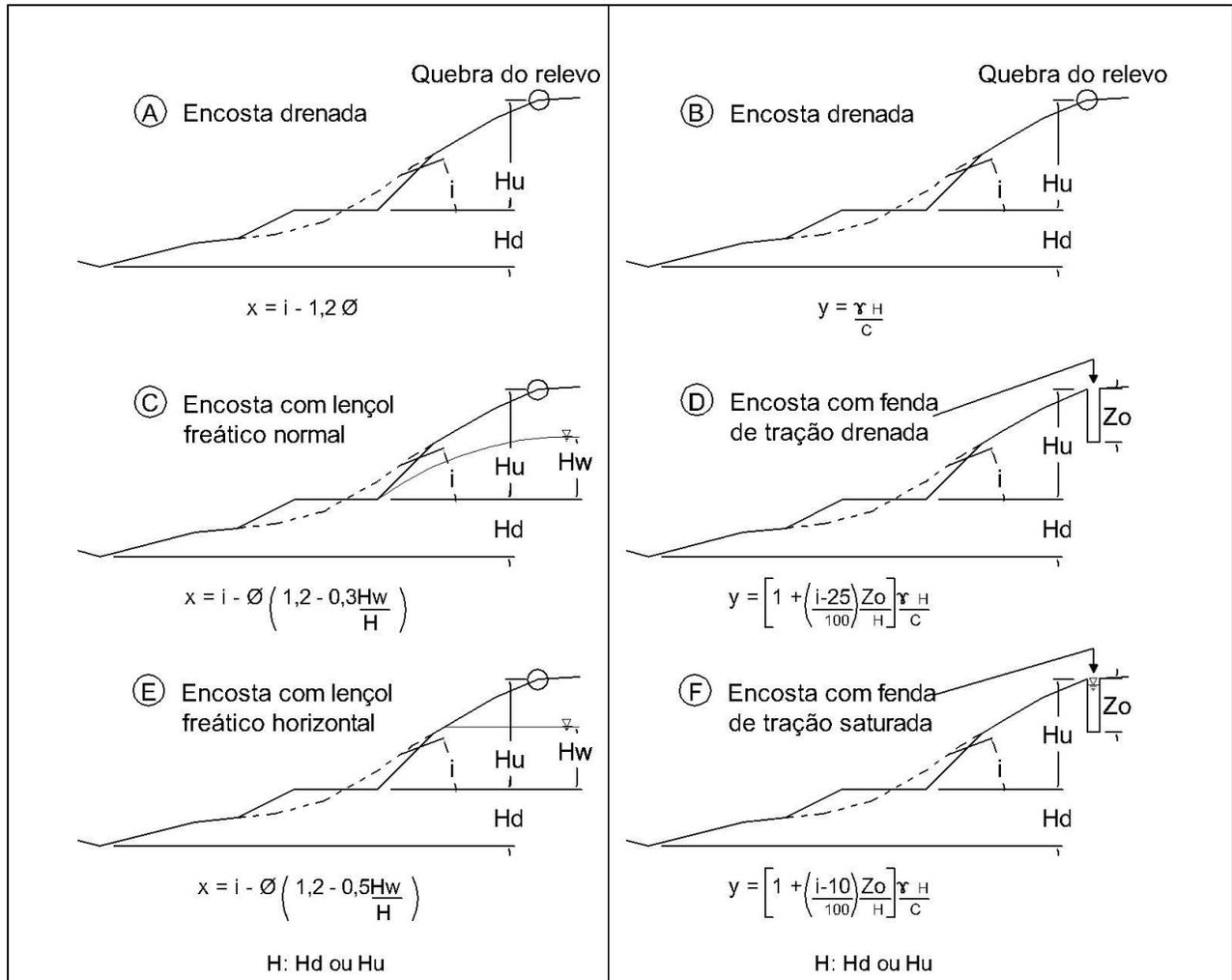


Figura 3.1. Condições para o caso de deslizamento circular (adaptada de Sánchez, 1989)

Onde:

–  $\varphi$ : ângulo de atrito do material.

–  $c$ : coesão do material.

- $\gamma$ : densidade específica do material.
- $H_u$ : altura superior de análise, considerada desde o nível de rasante até a mudança de inclinação ou uma quebra do relevo, ou a localização de uma fenda de tração.
- $H_d$ : altura inferior de análise, considerada desde o nível de rasante até a mudança de inclinação abaixo na encosta, um vale ou uma quebra no relevo.
- $H_w$ : altura estabilizada do lençol freático.
- $i$ : ângulo de inclinação da encosta.
- $Z_o$ : profundidade da fenda de tração.

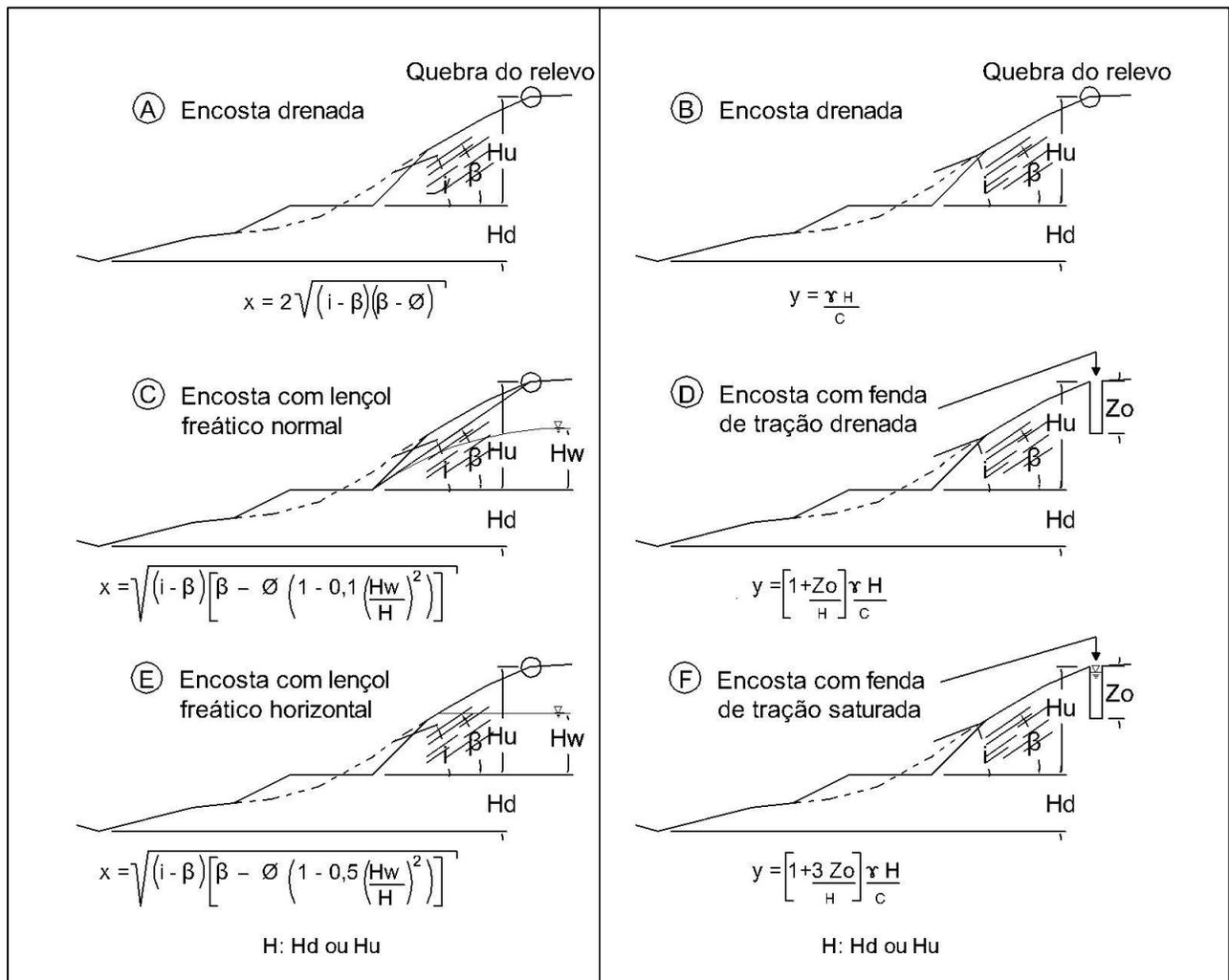


Figura 3.2. Condições para o caso de deslizamento planar (adaptada de Sánchez, 1989)

Onde:

- $\varphi$ : ângulo de atrito do material.
- $c$ : coesão do material.
- $\gamma$ : densidade específica do material.
- $H_u$ : altura superior de análise, considerada desde o nível de rasante até a mudança de inclinação ou uma quebra do relevo, ou a localização de uma fenda de tração.
- $H_d$ : altura inferior de análise, considerada desde o nível de rasante até a mudança de inclinação abaixo na encosta, um vale ou uma quebra no relevo.
- $H_w$ : altura estabilizada do lençol freático.
- $i$ : ângulo de inclinação da encosta.
- $Z_o$ : profundidade da fenda de tração.
- $\beta$ : ângulo de mergulho aparente da família principal de discontinuidades na seção de análise.

As condições dos casos A, C e E servem para determinar a função X, e as dos casos B, D e F para determinar a função Y. Essas condições dependem da geomorfologia e do clima da zona de aplicação da metodologia.

Para escolher as condições de análise da água subsuperficial e qual caso utilizar, é importante levar em conta os seguintes conceitos geomorfológicos qualitativos, relativos à orientação do eixo da estrada em comparação com a direção do fluxo d'água.

São definidos três tipos de fluxo de água subsuperficial nas encostas da estrada: divergente, convergente e paralelo, dependendo da orientação do eixo da rodovia com respeito às curvas de nível do terreno, como se pode ver na Figura 3.3:

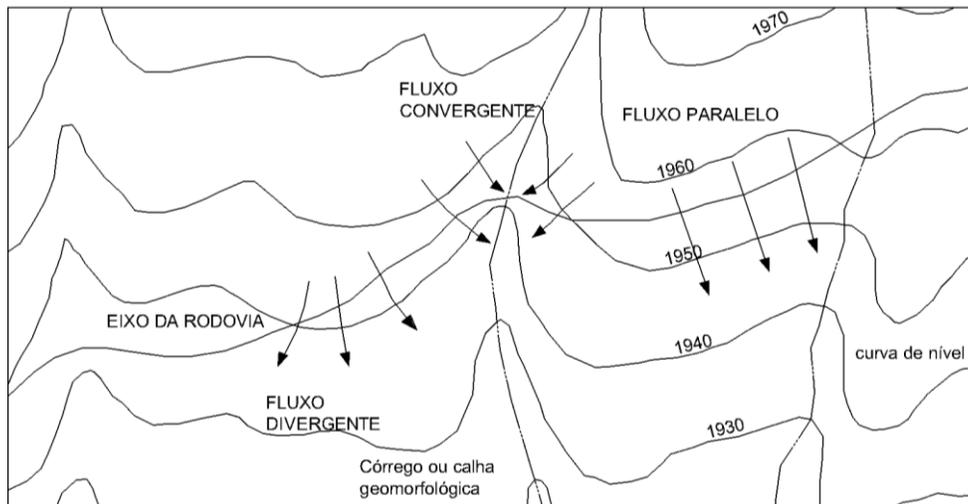


Figura 3.3. Condições de fluxo para análise

Onde:

- Se o eixo da estrada corta a topografia em saliente topográfico – ou seja, a encosta tem uma forma convexa –, então considera-se que acontece fluxo divergente, porque a água tentará escorregar para fora dessas encostas. Neste caso, podem ser usados os casos A e C das cartas, que analisam a encosta considerando-a seca.
- Se o eixo da estrada corta paralelo em relação à topografia, considera-se que o fluxo é paralelo, pois a água tentará escorregar pela encosta. Neste caso, podem ser usados os casos B e D das cartas, que analisam a encosta considerando que existe um lençol freático parabólico, que deixa a face do talude seca.
- Se o eixo da estrada corta a topografia em um córrego ou calha geomorfológica, considera-se que existe fluxo convergente, pois a água tentará escorregar diretamente para o córrego. Neste caso, podem ser usados os casos E e F das cartas, que analisam a encosta considerando um lençol freático horizontal.

Com relação ao clima, espera-se que, nas zonas com muita precipitação, a maioria das encostas sejam avaliadas com os casos E e F e que os valores de HSQI sejam menores, e que, nas zonas

mais secas, o HSQI seja avaliado com os casos A e C e os valores de HSQI sejam maiores. Deve-se fazer uma calibração da metodologia para zonas e climas diferentes, de forma a possibilitar a avaliação da sua influência nessas condições de análise.

Uma vez definidas as condições de análise e os valores das funções X e Y, os resultados são colocados nas cartas de deslizamento circular e planar indicadas na Figura 3.4 e na Figura 3.5, obtendo-se assim o HSQI.

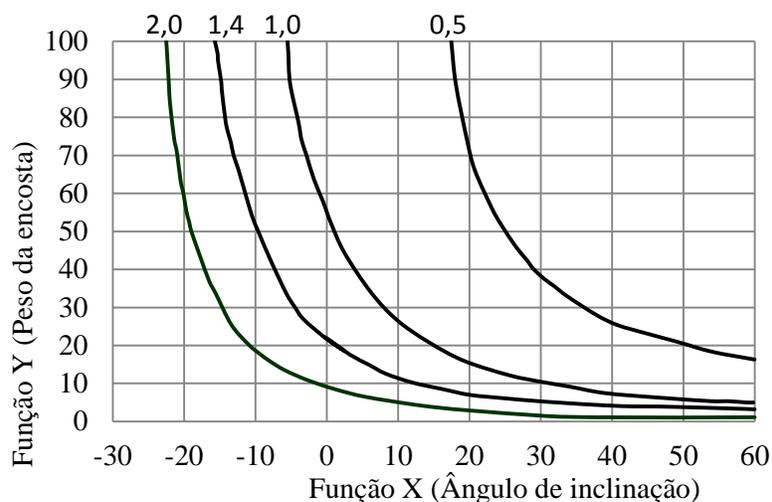


Figura 3.4. HSQI para deslizamento circular (adaptada de Sánchez, 1989)

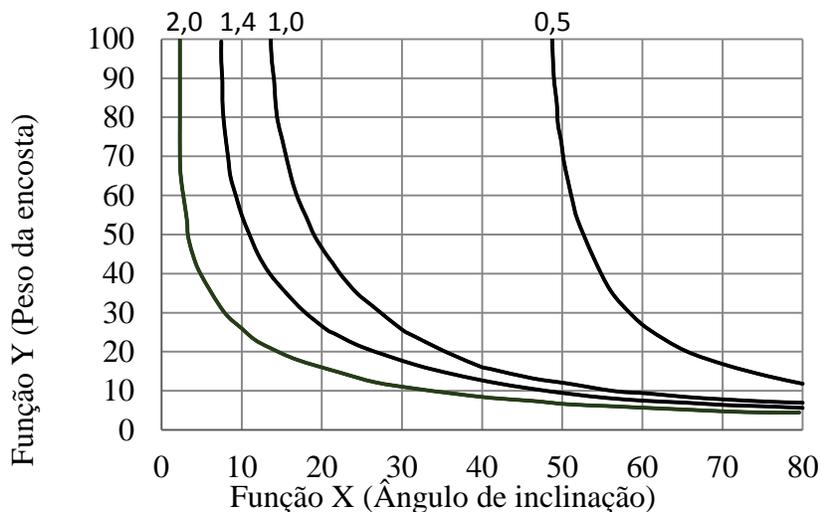


Figura 3.5. HSQI para deslizamento planar (adaptada de Sánchez, 1989)

### 3.2. HSQI vs. FS

Para avaliar a representatividade do método de cálculo de índice de qualidade de encosta HSQI proposto, foi feita uma comparação com os valores de fator de segurança de 22 taludes, calculados com o método de equilíbrio limite, rodados no programa *Geoslope*®.

Os valores de altura e inclinação para os 22 casos de taludes analisados foram tomados sistematicamente, mas os parâmetros geotécnicos foram fornecidos com base nos materiais encontrados na estrada Las Palmas, como se apresenta na Tabela 3.1. O valor do peso específico ( $\gamma$ ) foi tomado como 18 kN/m<sup>3</sup>.

Tabela 3.1. Taludes analisados com a metodologia HSQI e o programa *Geoslope*®

Caso	H (m)	i (°)	c (kPa)	$\phi$ (°)	HSQI (Caso A e C)	FS <i>Geoslope</i> ®
1	5	80	34,0	25,0	1,6	2,3
2	5	60	25,0	38,0	1,8	2,8
3	10	60	34,0	25,0	1,4	1,7
4	10	80	14,0	21,0	0,5	0,7
5	15	60	17,1	30,1	0,8	1
6	15	80	34,0	25,0	0,8	1
7	20	50	17,1	30,1	0,9	1,1
8	20	60	19,1	23,4	0,7	0,8
9	25	30	24,6	28,3	1,5	1,7
10	25	60	19,1	23,4	0,6	0,7
11	30	60	25,0	38,0	0,9	1
12	30	40	34,0	25,0	1,1	1,6
13	40	60	25,0	38,0	0,8	0,9
14	40	80	25,0	38,0	0,5	0,6
15	50	40	17,1	30,1	0,8	1
16	50	60	25,0	38,0	0,7	0,9
17	60	40	34,0	25,0	0,8	1
18	60	70	25,0	38,0	0,5	0,7
19	70	40	34,0	25,0	0,8	1
20	80	40	19,1	23,4	0,6	0,7
21	90	60	25,0	38,0	0,5	0,8
22	100	80	25,0	38,0	0,5	0,4

Para calcular o HSQI, foram adotadas as hipóteses de talude drenado – ou seja, foram usados os casos A e C para calcular as funções X e Y– e, para o cálculo do FS, foram adotadas as mesmas condições de talude drenado.

Observa-se, na Figura 3.6, que o HSQI baseado na metodologia de Nancy relaciona-se com o fator de segurança de uma maneira exponencial. Para HSQI entre 0,5 e 1,0, existe uma correlação muito boa com o fator de segurança – ou seja, os valores são muito similares. Para HSQI maiores que 1,0, essa correlação diminui e o fator de segurança calculado com o método de equilíbrio limite é maior que o valor de HSQI.

Os valores baixos de HSQI (menores que 1,0) são os que mostram a maior suscetibilidade nas encostas e, justamente, são os que têm melhor relação com a avaliação do fator de segurança dos taludes. Então, pode-se dizer que o cálculo do HSQI é representativo para a avaliação da suscetibilidade a deslizamento das encostas.

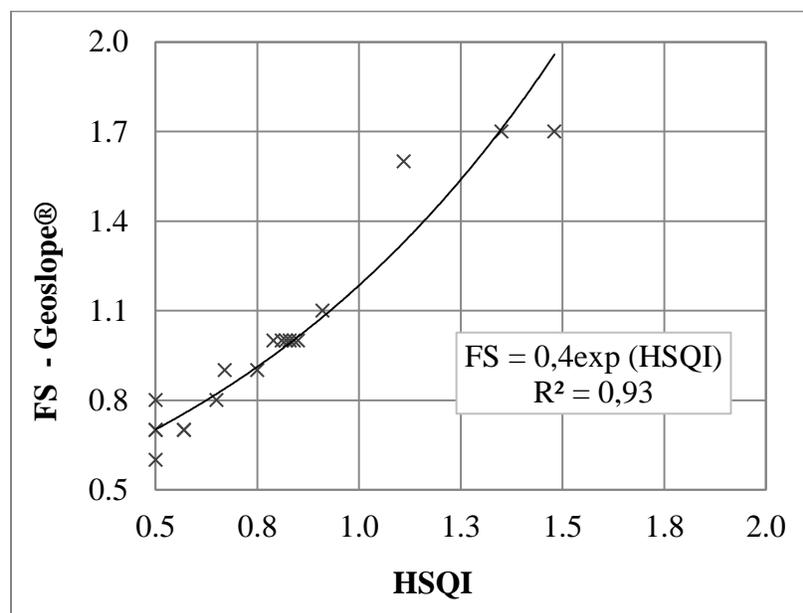


Figura 3.6. Comparação entre o fator de segurança do programa *Geoslope*® e o HSQI

### 3.3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A aplicação desta metodologia é simples e sistemática. É necessário que exista o projeto geométrico da estrada para que se tenha a informação da largura das calçadas e das inclinações

propostas para os taludes de corte e de aterros, e para que se faça, assim, o zoneamento ao longo do traçado. No fluxograma da

Figura 3.7, é mostrado o procedimento de análise:

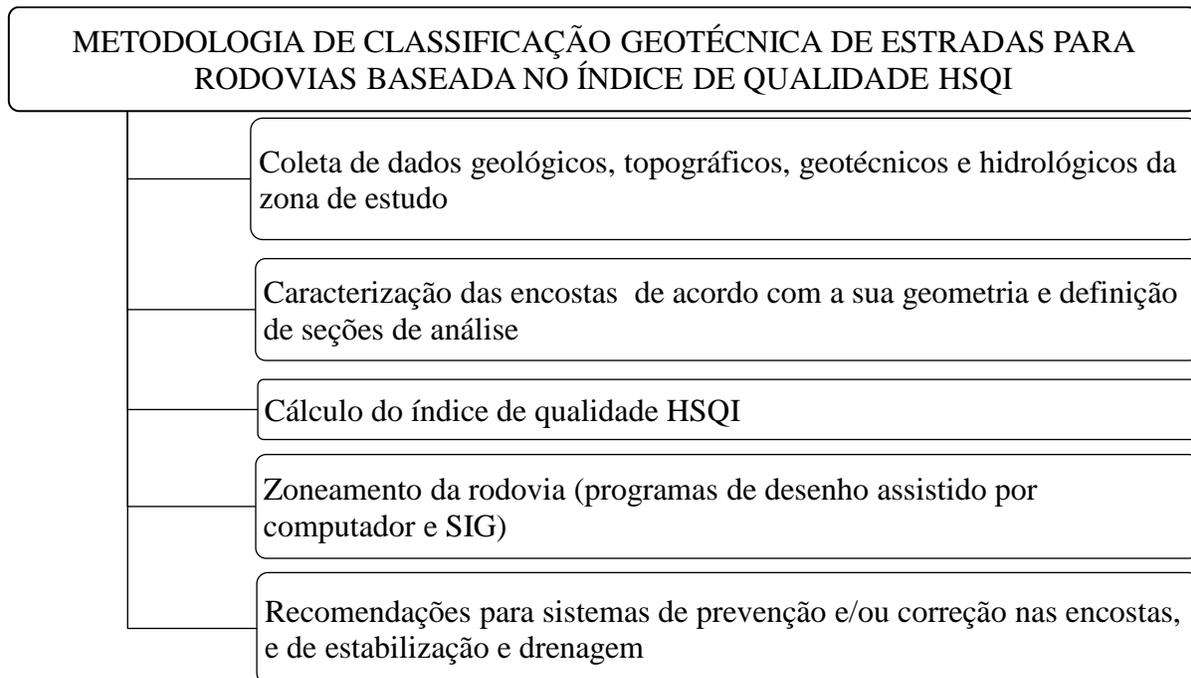


Figura 3.7. Metodologia HSQI de classificação geotécnica de encostas para rodovias

A seguir, cada uma dessas fases é descrita.

### 3.3.1. COLETA DE INFORMAÇÃO

Uma vez definido o projeto da estrada a ser construída, é necessário coletar a informação geológica (carta geológica ou de formações superficiais), os dados hidrológicos (registros de precipitação) e os dados de parâmetros físico-mecânicos dos materiais (peso específico  $\gamma$ , coesão  $c$ , ângulo de atrito  $\phi$  de solos e rochas) da zona.

Com essa informação, é possível definir as unidades geológicas dentro da área de estudo, assim como as propriedades físico-mecânicas de cada uma. É possível também prever o comportamento do lençol freático, levando em conta a topografia e as condições de clima na zona.

### 3.3.2. CARACTERIZAÇÃO DE ENCOSTAS DE ACORDO COM A SUA GEOMETRIA E DEFINIÇÃO DE SEÇÕES DE ANÁLISE

Com base no projeto geométrico proposto, é definida a largura da estrada para cada seção transversal, denominada pelo autor como  $B$ . Para verificar a influência que gera a construção do talude de corte na estabilidade da encosta, recomenda-se analisar a topografia de uma faixa de comprimento igual à somatória das distâncias  $D_u$ ,  $D_d$  e  $B$ . O cálculo de HSQI deve ser realizado com as alturas de encosta acima  $H_u$  e de encosta abaixo  $H_d$ , e o valor final de qualidade de encosta é determinado mediante a escolha do menor valor entre ambas as encostas. Na Figura 3.8, são apresentadas as distâncias anteriormente mencionadas:

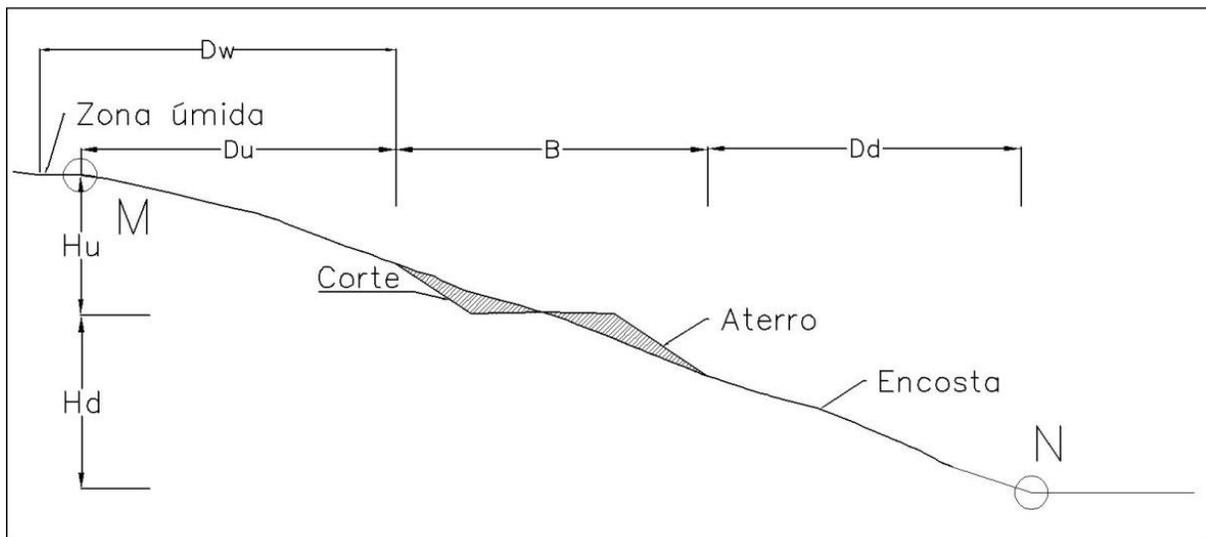


Figura 3.8. Largura mínima recomendada para cada seção transversal

Onde:

- $B$ : largura da calçada com os taludes propostos.
- $D_d$ : distância de análise encosta abaixo até uma mudança topográfica notável. Caso não exista, deve ser tomada como  $D_b = B$ . Essa distância é definida com o ponto  $N$ .
- $D_u$ : distância de análise encosta acima até uma mudança topográfica notável. Caso não exista, deve ser tomada como  $D_u = B$ . Essa distância é definida com o ponto  $M$ .

– Dw: distância de análise encosta acima até a planície que representa uma zona úmida. Caso seja comprovada a existência dessa zona plana (e úmida) numa distância  $Dw < 2B$ , a distância Dw deve substituir a Du na análise de estabilidade. O ponto M deve ser relocado para ser compatível com Dw.

– Hu: altura superior de análise, considerada desde o nível de rasante até o ponto M.

– Hd: altura inferior de análise, considerada desde o nível de rasante até o ponto N.

Na Figura 3.9, pode-se ver o comprimento da zona de análise, que está limitada pelas linhas M (encosta acima) e N (encosta abaixo). Assim, o comprimento desta zona será a somatória das distâncias Hd, Hu e B.

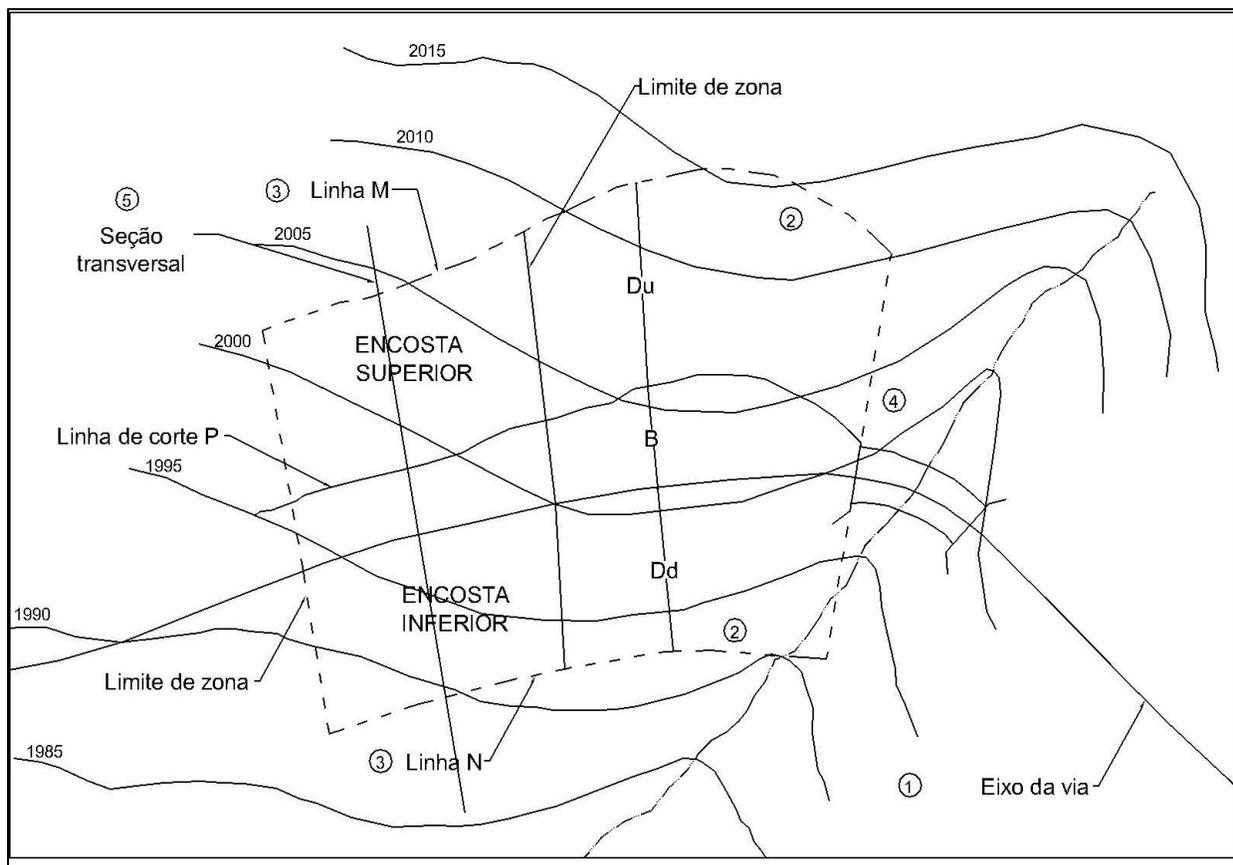


Figura 3.9. Definição da área de análise

Para fazer a análise de HSQI, é necessário dividir as estradas em zonas. O comprimento mínimo recomendado de uma zona de análise é a somatória das distâncias  $D_d$ ,  $D_u$  e  $B$ . O comprimento máximo de uma zona de análise depende da unidade geomorfológica independente – ou seja, de regiões com condições e propriedades geométricas, geológicas e hidrológicas similares.

Uma unidade geomorfológica independente (UGI) é uma região ou zona com condições topográficas, geológicas e hidrológicas relativamente homogêneas, que possa ser estudada e avaliada individualmente.

Infelizmente, neste trabalho não foi possível utilizar esse conceito, devido à determinação sistemática das zonas a cada 100m. No entanto, é importante que o conceito seja adicionado à metodologia para aperfeiçoá-la.

### **3.3.3. ANÁLISE PRELIMINAR DE ESTABILIDADE DAS ENCOSTAS E OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE HSQI**

A análise preliminar de estabilidade de encostas é realizada com a metodologia apresentada, anteriormente, na Seção 3.1.

Para realizar esta etapa, é importante ter a informação da geometria e de parâmetros geotécnicos. A informação da geometria deverá ser estabelecida para cada zona da estrada e obtida mediante a análise explicada na seção anterior. A informação dos parâmetros geotécnicos pode ser obtida por meio de ensaios ou de informação de materiais similares aos que se encontram na zona de análise.

O processo de análise é realizado para as encostas de ambos os lados da via. A altura superior  $H_u$  e a altura inferior  $H_d$  são usadas para calcular o HSQI, e depois se seleciona o menor valor de HSQI como o valor representativo da encosta.

### **3.4. ZONEAMENTO DA ESTRADA**

Os valores limites de HSQI para classificar a suscetibilidade da encosta a deslizamento são apresentados na Tabela 3.2. Esses valores devem ser atribuídos a cada seção de análise definida no ponto anterior.

Tabela 3.2. Valores do índice de qualidade de encostas

<i>Hillslope Quality Index</i>	<i>Suscetibilidade a deslizamento</i>
HSQI $\leq$ 1,0	Alta
1,0 < HSQI < 1,4	Média
HSQI > 1,4	Baixa

Esses valores de HSQI foram propostos de acordo com as seguintes hipóteses probabilísticas:

– Se pelo menos cinquenta por cento das encostas classificadas com suscetibilidade alta apresentam ruptura – como visto na Eq. 3.1 –, então pode-se considerar que o sistema de classificação é aceitável.

$$\frac{\text{Número total de encostas classificadas com suscetibilidade alta}}{\text{Número total de encostas classificados com suscetibilidade alta rompidas}} \cong 50 \% \quad (3.1)$$

– Se aproximadamente vinte e cinco por cento das encostas classificadas com suscetibilidade média apresentam ruptura – como visto na Eq. 3.2 –, então pode-se considerar que o sistema de classificação é aceitável.

$$\frac{\text{Número total de encostas classificadas com suscetibilidade média}}{\text{Número total de encostas classificados com suscetibilidade média rompidas}} \cong 25 \% \quad (3.2)$$

– Se, no máximo, cinco por cento das encostas classificadas com suscetibilidade baixa apresentam ruptura – como observado na Eq. 3.3 –, o método é considerado aceitável.

$$\frac{\text{Número total de encostas classificadas com susceptibilidade baixa rompidas}}{\text{Número total de encostas classificadas com susceptibilidade baixa}} \cong 5 \% \quad (3.3)$$

### **3.5. RECOMENDAÇÕES DE ESTABILIZAÇÃO E DRENAGEM**

Para fornecer recomendações de obras de estabilização e drenagem, é preciso, primeiro, saber a suscetibilidade da encosta a deslizamento – que é avaliada mediante o índice de qualidade HSQI – porque esse fator determina a magnitude do sistema de tratamento. Também é importante saber qual é a altura da encosta porque esse fator determina o tipo de obras que podem ser recomendadas. Por exemplo: para alturas menores que 10 metros, os muros flexíveis de concreto armado ou de gaviões são muito apropriados; mas, se a encosta tem altura superior a 15 ou 20 metros, as cortinas ancoradas são mais apropriadas (GEO-RIO, 1999).

A seguir, serão introduzidos os termos de altura corrigida  $H_c$ , para análise das recomendações de obras de estabilização e drenagem, e de gráfico de desempenho das encostas da rodovia.

#### **3.5.1. CORREÇÃO DE ALTURA PARA CONSIDERAR OS SISTEMAS DE PREVENÇÃO**

Para aperfeiçoar as recomendações para sistemas de prevenção e correção das encostas, é introduzido um fator para corrigir a altura em função da importância da estrada. Com isso, as recomendações de suporte ou de sistemas de estabilização e drenagem podem ser fornecidas de acordo com o tipo de projeto, o que permite melhorar a estimativa de custos.

A introdução de um fator de correção de altura de encosta em função do grau de importância da estrada foi tomada com base no critério de Barton *et al.* (1974), que sugere valores *Excavation Support Ratio* (ESR) que relacionam o uso previsto da escavação com o grau de segurança exigido do sistema de suporte para manter a estabilidade da escavação.

Na Tabela 3.3, são mostrados os valores do fator de correção recomendados para cada tipo de via, dependendo da sua importância, a qual pode ser definida pelo critério de quantidade de veículos pesados que transitem por ela:

Tabela 3.3. Fatores de correção de altura da encosta

<i>Tipo</i>	<i>Importância da estrada</i>	<i>Fator de correção (FC)</i>
I	Temporária	1,5
II	Permanente, com previsão de pouco fluxo veicular	1,3
III	Permanente, com previsão de fluxo veicular médio	1,0
IV	Permanente, com previsão de fluxo veicular alto	0,8
V	Fundamental, com previsão de fluxo veicular alto	0,6

Uma vez definido o fator de correção, é calculada a altura corrigida  $H_c$ , conforme a Eq. 3.3:

$$H_c = \frac{H}{F_c} \quad (3.3)$$

Onde:

$H$  é a altura da encosta considerada ( $H_u$  ou  $H_d$ ) e  $F_c$  é o fator de correção adotado de acordo com a importância da via.

O valor de altura corrigida ( $H_c$ ) é aplicado unicamente no gráfico de recomendações que será explicado no seguinte título.

Os valores desses fatores de correção são propostos pelo autor e, para os propósitos deste trabalho, o processo de calibração foi feito para vias tipo III – ou seja, foi utilizado o fator de correção  $F_c$  de 1,0.

### 3.5.2. GRÁFICO DE DESEMPENHO

De acordo com os valores de  $HSQI$  e o fator de correção para a estrada a ser estudada – a estrada Las Palmas, em Medellín –, foi construído um gráfico de desempenho esperado (Figura 3.10), o qual é útil para estabelecer as recomendações de estabilização e drenagem na etapa preliminar e permite ao proprietário do projeto fazer estimativas de custos.

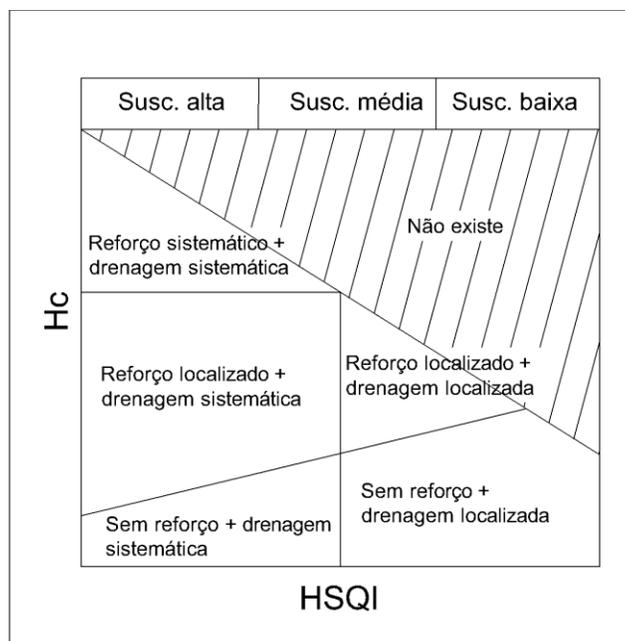


Figura 3.10. Gráfico de desempenho esperado e recomendações de suporte de acordo com o índice de qualidade HSQI

Da Figura 3.10, pode-se ver que:

- Existe uma incompatibilidade entre o índice de qualidade de encosta HSQI e a altura corrigida da encosta, devido a que para encostas com alturas muito grandes, não é possível, fisicamente, valores de susceptibilidade a deslizamento muito baixos. Por essa razão, foi determinada uma zona inexistente, que decidiu se fazer de forma triangular devido a que é mais simples.
- Com este gráfico, espera-se determinar as recomendações de obras de reforço e drenagem para as diferentes combinações de HSQI e de altura corrigida Hc.
- Espera-se que as encostas com valores altos de HSQI – ou seja, suscetibilidade a deslizamento baixa – e baixos de Hc só necessitem drenagem localizada.
- Espera-se que para encostas com valores altos de HSQI – ou seja, suscetibilidade baixa – e altos de Hc sejam necessários tanto reforço como drenagem localizados.
- Espera-se que para encostas com valores baixos de HSQI – ou suscetibilidade alta – e baixos de Hc seja necessária apenas drenagem sistemática – ou seja, um tratamento ao longo de toda a encosta.

- Espera-se que para encostas com valores baixos de HSQI – ou suscetibilidade alta – e altos de Hc sejam necessários reforço e drenagem sistemática – ou seja, obras de tratamento ao longo de toda a encosta.

Este gráfico é indicativo e os valores dependem da calibração da metodologia feita na rodovia Las Palmas, que é explicada no capítulo seguinte.

## 4. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA

No capítulo anterior, foi apresentada a descrição da metodologia HSQI, a forma como se realiza a sua aplicação e as características da estrada Las Palmas – na qual a metodologia foi aplicada e avaliada.

Neste capítulo, são mostrados a descrição das principais características da estrada Las Palmas; os resultados da pesquisa feita; as fontes de dados; as obras de tratamento encontradas no trabalho de campo; o método utilizado para a análise de dados; a avaliação da metodologia de classificação HSQI, mediante o método ROC; e os produtos finais, que são os gráficos de desempenho.

### 4.1. LOCALIZAÇÃO

O projeto da via escolhido para análise está localizado ao sudoeste da cidade de Medellín, capital do departamento de Antioquia, na Colômbia. Na Figura 4.1, é mostrada a localização do projeto denominado Las Palmas. O estudo concentra-se entre o km 0+000 (área urbana de Medellín) e o km 14+300.

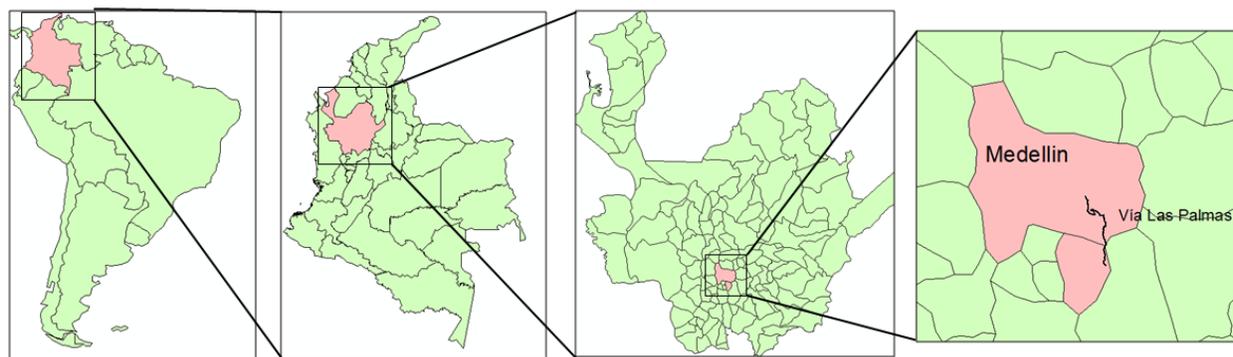


Figura 4.1. Esquemas de localização da área de estudo

### 4.2. RODOVIA LAS PALMAS

A estrada Las Palmas é uma das rotas de entrada da cidade de Medellín, da região oriental de Antioquia e do Aeroporto Internacional JMC. Há mais de sessenta anos, é uma rodovia de grande

importância para a região. Há aproximadamente dez anos, foi feita a ampliação da dupla calçada, o que gerou novos cortes nas encostas existentes na época, produzindo assim novas zonas suscetíveis a deslizamento ao longo da estrada.

Essa estrada tem um total de 20km, os quais apresentam, na maioria, encostas com inclinações entre 30° e 90°, com alturas muito variáveis – de cinco até 100 metros. Ao longo de toda a sua história, ocorreram problemas de estabilidade, que exigiram medidas de estabilização. Essa zona apresenta uma suscetibilidade a deslizamentos gerados por muitos fatores naturais e/ou antrópicos.

### **4.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS**

O vale de Aburrá tem uma geologia muito diversa. Na zona do projeto, existem, principalmente, rochas metamórficas, em unidades como migmatitos e anfibolitos. E, nos primeiros quilômetros, encontram-se unidades ígneas como dunitos, pertencentes ao *Stock* de San Diego. São comuns também os depósitos de fluxos de detritos e/ou lamas de diferentes idades (Amva, 2006).

A seguir, cada uma das unidades geológicas encontradas ao longo do trecho de estudo da estrada Las Palmas é melhor detalhada:

– Anfibolitos de Medellín (PRaM): rochas densas, duras, de cores cinza-verdosas, que geram solos residuais de até de 30 metros de profundidade. Os solos residuais maduros são limoargilosos, de cor marrom-avermelhada e baixa compressibilidade, com profundidades de até 20 metros. Encontram-se entre o km 2 e o km 3, e no km 12.

– *Stock* de San Diego (JgSD): é um corpo ígneo que aflora no centro-orientado da cidade de Medellín. Caracteriza-se por ter perfis de intemperismo bem profundos, de mais de 50 metros em algumas zonas. Os solos residuais maduros são limoarenosos, de cor marrom-avermelhada e baixa compressibilidade. Essa formação encontra-se nos primeiros 8 quilômetros da rodovia, saindo da cidade de Medellín. Na Figura 4.2, é mostrado um detalhe de um afloramento:



Figura 4.2. Detalhe de um afloramento de rochas do *Stock* de San Diego (JgSD) – km 5+200

– Dunitos de Medellín (KuM): rochas escuras que se tornam verdosas, dependendo do grau de intemperismo. Geram solos residuais de textura limosa e cor marrom-avermelhada. Não geram perfis de solo muito profundos. Localizam-se do km 8 ao km 10 da estrada.

– Fluxos de lamas e/ou detritos (FI, FII, FIII, FIV e Fpre I): esses depósitos são constituídos por fluxos de detritos ou lamas de várias gerações. Geralmente, têm uma matriz de cor marrom-amarelada e marrom-avermelhada e textura limoargilosa em volta de cantos e blocos de rochas. Se o predomínio é da matriz, são considerados fluxos de lamas ou, se dominam os blocos, fluxos de detritos. Encontram-se ao longo de toda a estrada.

– Depósitos antrópicos (QI e QII): são solos derivados das atividades urbanísticas e construtivas. Caracterizam-se por serem muito heterogêneos e não terem propriedades geotécnicas fixas. Encontram-se ao longo de toda a estrada.

– Depósitos aluviais (Qal): são depósitos que se apresentam principalmente nos fundos dos vales do rio Aburrá e dos seus principais afluentes. Desenvolvem geformas suaves e praticamente planas ao longo dos córregos de água. Os solos são principalmente gravas e gravas arenosas.

– Depósitos aluviotorrenciais (Qat): a essa formação geológica superficial pertencem os depósitos gerados por avenidas torrenciais em córregos e riachos, nas quais a alta energia da água lhe permite arrastar materiais de granulometria muito heterogênea. Esses materiais são transportados pelos córregos até serem depositados em zonas com inclinação menor. Os solos gerados são muito heterogêneos, desde solos limoargilosos até gravas arenosas.

– Depósitos de deslizamento (Qd): são produto de fenômenos de instabilidade de movimentos em massa ocorridos nos terrenos inclinados, em consequência de fatores como gravidade, água e intervenção humana, entre outros. Geralmente, estão associados a locais com baixa inclinação e topografia suave seguidos de uma zona com inclinação elevada na qual foram gerados os materiais de escorregamento. Os solos desenvolvidos são principalmente argilosos.

– Migmatitos de Puente Peláez (PRmPP): essa formação está composta principalmente por gnaisses, com bandeamentos. Profundidades de solo de até 3 metros e solos limosos, de cor amarela. Na Figura 4.3, é apresentado um afloramento dessa formação. Encontra-se na estrada desde o km 10 até o final do trecho de estudo, no km 14+500.

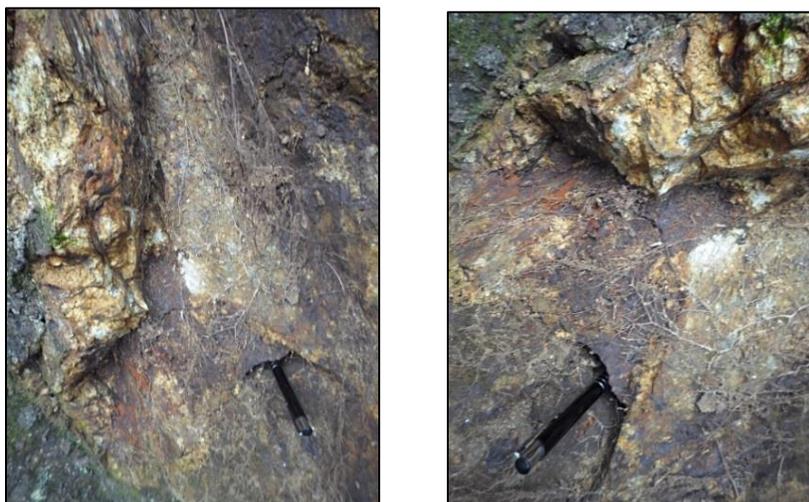


Figura 4.3. Afloramento de migmatitos (PRmPP) – km 12+500

Na Figura 4.4, é apresentada a geologia do trecho estudado da estrada Las Palmas:

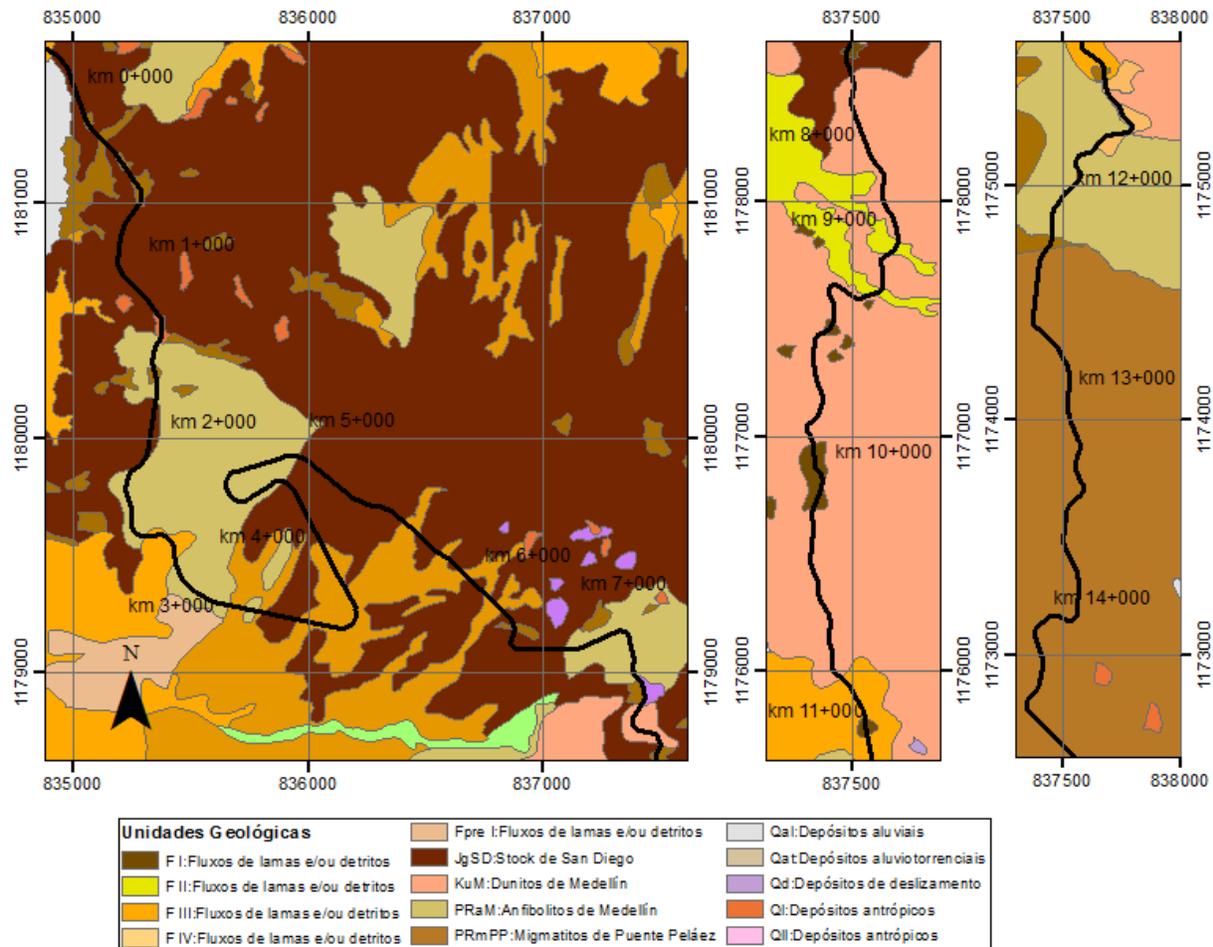


Figura 4.4. Geologia do trecho em estudo da rodovia Las Palmas ( Amva, 2006)

#### 4.4. CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS

Quanto ao clima no trecho da estrada estudado, é importante observar que a via começa na mesma elevação da cidade de Medellín – localizada no vale do rio Aburrá –, a, aproximadamente, 1.500m, e acaba no km 14+500, a uma altitude aproximada de 2.400m, na parte alta da zona oriental do vale. Portanto, existe algum grau de variabilidade das condições climáticas – principalmente, de precipitação –, entre os primeiros quilômetros da estrada e os finais.

Medellín tem um clima bimodal, com precipitações máximas nos meses de abril e outubro, com uma média de 1.750mm/ano no vale e 2.000mm/ano na parte alta da zona oriental.

## 4.5. COLETA DE INFORMAÇÃO

A informação requerida para este trabalho foi a seguinte:

– Topografia: obtida da base de dados Área Metropolitana do Vale de Aburrá (Amva). Na Figura 4.5, é mostrado um detalhe da topografia da estrada. Curvas de nível a cada 2 m. Largo de búffer 50 m.

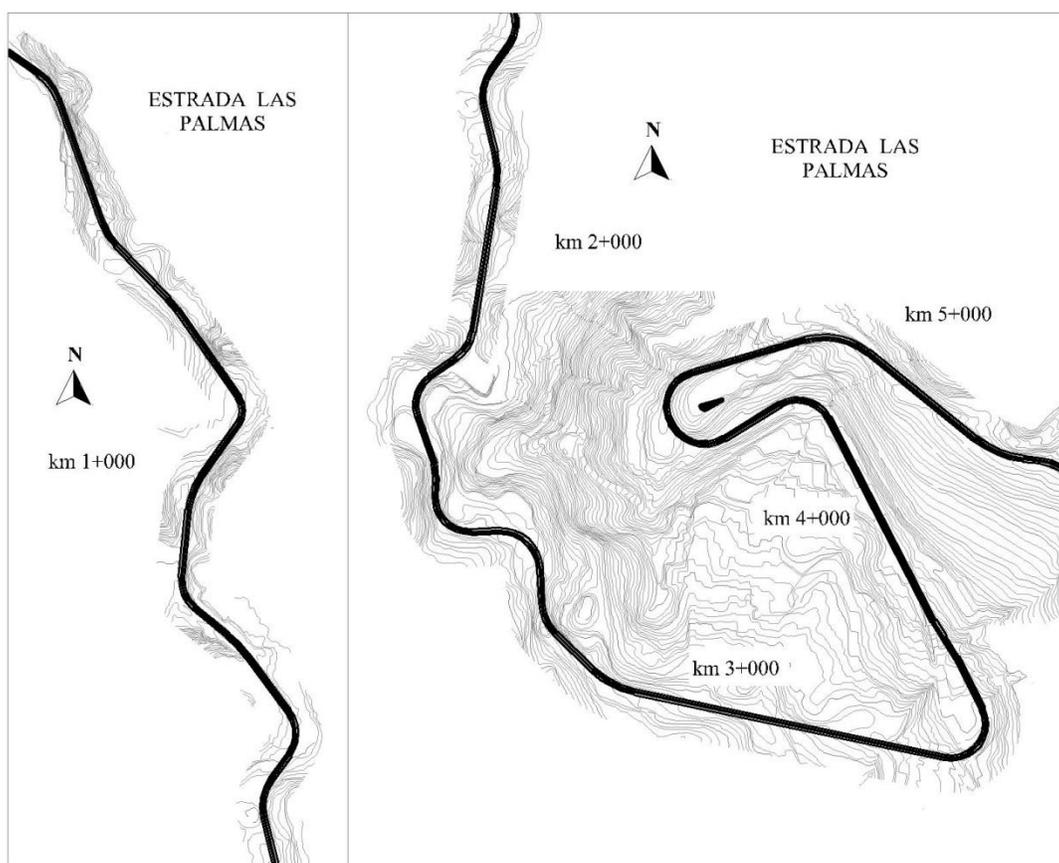


Figura 4.5. Detalhe da topografia da via Las Palmas. Curvas a cada 2m

– Informação geológica: obtida a partir de fontes secundárias, como estudos de zoneamento da cidade de Medellín e o microzoneamento sísmico da Área Metropolitana do Vale de Aburrá (Amva, 2006).

- Informação de parâmetros geotécnicos: obtida a partir de ensaios de cisalhamento direto, perfurações e estudos de zoneamento disponibilizados por uma empresa da cidade de Medellín. No Anexo 3, é mostrada a tabela das propriedades e parâmetros geotécnicos utilizados nas análises.
- Informação hidrológica: adquiridos os dados correspondentes a três estações pluviométricas do Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais (IDEAM).
- Inventário de deslizamento: obtido de trabalhos anteriores (Muñoz & Martínez, 2013).
- Dados geométricos das encostas ao longo da rodovia: adquiridos por meio da realização de um trabalho de campo.

#### **4.6. TRABALHO DE CAMPO**

O trabalho de campo, realizado nos meses de dezembro de 2014 e janeiro de 2015, consistiu na coleta de dados geométricos de 129 encostas – que se encontra detalhada no Anexo 3 –, aproximadamente a cada 100 metros, considerando-se esse comprimento como a largura da zona. Foi feito também o inventário das principais obras de manutenção e estabilização no percurso do km 0+000 até o km 14+400.

Como parte do trabalho de campo, foi feita uma inspeção visual dos taludes para coletar os dados geométricos de altura e inclinação e para verificar a condição atual de estabilidade deles, junto com as obras de estabilização e drenagem presentes.

#### **4.7. TRATAMENTOS ENCONTRADOS**

A seguir, são descritos os diferentes tratamentos encontrados nas encostas da rodovia.

#### 4.7.1. MUROS

Os muros vistos em campo tinham alturas máximas de 5 metros. A maior parte dos muros encontrados era de concreto armado, como visto na Figura 4.6. Também foram encontrados, com menor frequência, muros de gravidade como os muros de gaviões.



Figura 4.6. Muros em concreto armado no km 5+000

#### 4.7.2. CORTINAS ANCORADAS

As cortinas ancoradas compreendem uma parede de concreto armado, com espessura entre 20 e 30cm, em função das cargas nos tirantes, fixada no terreno por meio de ancoragens pré-tensionadas (GEO-RIO, 1999). Ao longo da rodovia, essa solução foi muito observada, devido à sua flexibilidade. Na

Figura 4.7, pode-se observar um exemplo de talude com cortina ancorada no primeiro quilômetro da estrada:



Figura 4.7. Cortinas ancoradas no km 0+400

#### **4.7.3. CONCRETO PROJETADO**

Proteção superficial contra a erosão em taludes, que consiste em uma camada protetora de boa resistência e durabilidade. Na Figura 4.8, pode-se ver um exemplo no km 11+800:



Figura 4.8. Concreto projetado no km 11+800

#### **4.7.4. DRENAGEM E PROTEÇÃO SUPERFICIAL**

Os projetos de drenagem superficial têm como objetivo diminuir os processos de infiltração, melhorando a estabilidade dos taludes. Dentro dos sistemas de drenagem superficial, foram

encontrados canaletas transversais e longitudinais, dissipadores de energia e caixas coletoras, como os mostrados na Figura 4.9:



Figura 4.9. Drenagem superficial nos km 6+700 e km 8+100

Também foram observados alguns sistemas de controle de erosão tais como revegetação dos taludes de corte e de aterro. Na Figura 4.10, pode-se ver um exemplo:

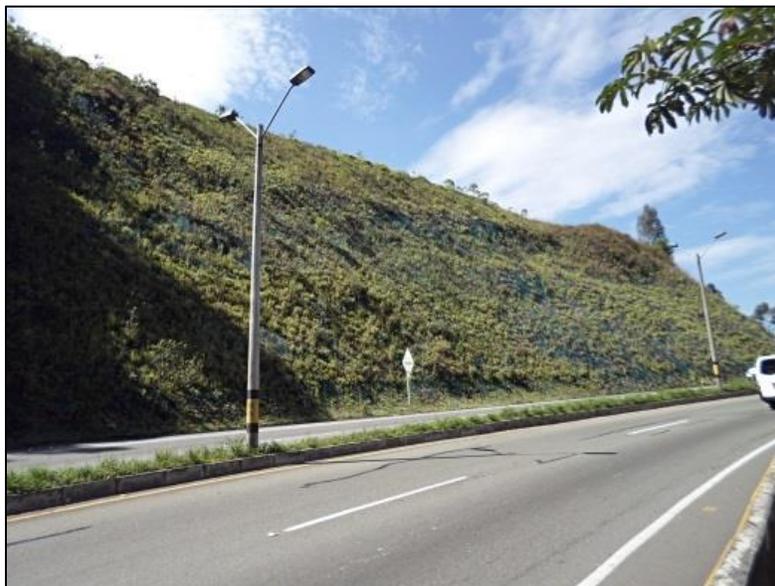


Figura 4.10. Controle de erosão nas encostas do km 8+500

#### 4.8. ANÁLISE DE DADOS

Depois de realizado o trabalho de campo, foram organizados todos os registros em um formato conforme o apresentado na Tabela 4.1. Esta tabela é um modelo. O banco de dados completo encontra-se no Anexo 3.

A cada zona, foram atribuídos os parâmetros geotécnicos de acordo com geologia onde estava localizada. Tendo os dados geotécnicos, foi realizada a análise de estabilidade para encontrar o índice de qualidade HSQI para cada encosta analisada, mediante as cartas da Escola de Nancy.

Uma vez definido o HSQI para cada zona, foi feita a classificação em três categorias.

Na Tabela 4.2, pode ser visto o número de encostas classificadas e daquelas que se romperam em cada categoria:

Tabela 4.1. Modelo do banco de dados

Localização	Índice de qualidade HSQI (Caso CB)	H (m)	i (°)	Inest.	Tratamentos				
					Muro de concreto reforçado	Muro de pilhas	Ancoragem e concreto projetado	Drenagem subsuperficial	Drenagem superficial
km 0+100	<b>0,7</b>	35	52	x			x	x	
km 0+200	<b>0,9</b>	40	40	x					x
km 0+300	<b>0,9</b>	30	45	x					
km 0+400	<b>0,6</b>	40	50	x					x
km 0+500	<b>0,8</b>	40	40	x					
km 0+600	<b>1,4</b>	12	40						
km 0+800	<b>0,7</b>	25	50	x			x	x	x
km 0+900	<b>0,8</b>	25	50	x					
km 1+000	<b>0,9</b>	20	50	x					
km 1+100	<b>0,6</b>	12	80	x					x
km 1+200	<b>1,2</b>	25	30						x
km 1+300	<b>0,6</b>	12	70	x					x
km 1+400	<b>0,6</b>	25	60	x					

Tabela 4.2. Resumo dos dados de campo

	Total de encostas	Encostas rompidas	Percentagem de encostas rompidas
Suscetibilidade baixa	32	1	3%
Suscetibilidade média	18	4	22%
Suscetibilidade alta	79	56	71%
Totais	129	61	47%

Os valores de HSQI tomados para definir as categorias de suscetibilidade alta, média e baixa foram os seguintes:

– Com o valor máximo de HSQI de 1,0 para encostas com suscetibilidade alta, 71 por cento das encostas classificadas com suscetibilidade alta apresentaram ruptura, conforme observado em campo – como mostrado na Eq. 4.1 –, o que cumpre com o critério probabilístico de aceitação anteriormente formulado.

$$\frac{\text{Número total de encostas classificadas com suscetibilidade alta}}{\text{Número total de encostas classificadas com suscetibilidade alta rompidas}} = 71\% \quad (4.1)$$

– Para encostas com suscetibilidade média, netre os valores de HSQI de 1,0 e 1,4. 22 por cento das encostas classificadas com suscetibilidade média apresentaram ruptura, conforme observado em campo – como mostrado na Eq. 4.2 –, o que cumpre com o critério probabilístico de aceitação proposto.

$$\frac{\text{Número total de encostas classificadas com suscetibilidade média}}{\text{Número total de encostas classificadas com suscetibilidade média rompidas}} = 22\% \quad (4.1)$$

– Com o valor de HSQI de 1,4, mínimo para classificar as encostas com suscetibilidade baixa, três por cento das encostas classificadas com suscetibilidade baixa apresentaram ruptura, como mostrado na Eq. 4.3, o que cumpre com o critério de aceitação proposto.

$$\frac{\text{Número total de encostas classificadas com suscetibilidade baixa rompidas}}{\text{Número total de encostas classificadas com suscetibilidade baixa}} = 3\% \quad (4.3)$$

Portanto, pode-se dizer que, com os valores mostrados na Tabela 4.3, são cumpridos os critérios de aceitação formulados na metodologia proposta.

Tabela 4.3. Valores do HSQI para cada categoria de suscetibilidade

<i>Hillslope Quality Index</i>	Suscetibilidade a deslizamento
HSQI $\geq$ 1,0	Alta
1,0 < HSQI < 1,4	Média
HSQI > 1,4	Baixa

O mapa final do zoneamento da estrada Las Palmas encontra-se no Anexo 6.

#### 4.9. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO ROC

Para a avaliação do método de classificação, foi utilizada a análise *Receiver Operating Characteristics* (ROC), explicada no Capítulo 2.

A análise ROC foi aplicada à avaliação do sistema HSQI tomando dois valores de classes reais – as encostas estáveis (verdadeiros) e instáveis (falsos), os quais foram obtidos a partir do trabalho de campo –, e dois valores de classes estimadas – encostas pouco suscetíveis e encostas suscetíveis.

Na Tabela 4.4, são mostradas as combinações dos valores das classes reais e estimadas:

Tabela 4.4. Análise ROC para o HSQI

		OBSERVAÇÕES DAS ENCOSTAS EM CAMPO	
		VERDADEIROS (Instáveis)	FALSOS (Estáveis)
ESTABILIDADE ESTIMADA DA ENCOSTA	POSITIVOS (HSQI BAIXO)	TP (56)	FP (23)
	NEGATIVOS (HSQI ALTO)	FN (1)	TN (31)

- Verdadeiro positivo (TP): encostas instáveis classificadas, corretamente, com índice de qualidade de encosta HSQI baixo. Por exemplo, pode-se observar, na Figura 4.11, a encosta do km 12+600. Esta foi classificada com suscetibilidade alta devido ao seu baixo índice de qualidade de 0,5 e, efetivamente, encontra-se instável em campo e, inclusive, com obras de drenagem.



Figura 4.11. Encosta km 12+600

- Verdadeiro negativo (TN): encostas estáveis classificadas, corretamente, com índice de qualidade alto. Por exemplo, a encosta da Figura 4.12 foi classificada com suscetibilidade baixa devido ao seu HSQI de 1,4 e, na realidade, está estável.



Figura 4.12. Encosta km 7+400

- Falso positivo (FP): encostas estáveis estimadas, incorretamente, com índices de qualidade baixos. Por exemplo, na Figura 4.13, pode-se ver uma encosta classificada com suscetibilidade alta devido ao seu HSQI de 0,6, mas, em campo, encontra-se estável.



Figura 4.13. Encosta km 14+00

- Falso negativo (FN): encostas instáveis estimadas, incorretamente, como pouco suscetíveis. Por exemplo, a encosta da Figura 4.14 foi classificada com suscetibilidade baixa, com um HSQI de 2,0, mas teve ruptura, já que apresenta uma cicatriz de deslizamento e um muro de contenção.



Figura 4.14. Encosta km 8+800

A taxa de verdadeiros positivos ou taxa de estimação é a relação entre as encostas instáveis classificadas, corretamente, com suscetibilidade alta e a totalidade das encostas instáveis vistas em campo. Na Eq. 4.3, é mostrada a taxa de estimação:

$$Taxa\ de\ estimação(tp\ rate) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4.3)$$

A taxa de falsos positivos é a relação entre as encostas estáveis classificadas, incorretamente, com suscetibilidade alta e a totalidade das encostas estáveis observadas em campo. Na Eq. 4.4, é mostrada essa taxa:

$$FP\ rate = \frac{FP}{FP + TN} \quad (4.4)$$

A taxa de verdadeiros negativos é a relação das encostas estáveis avaliadas, corretamente, com suscetibilidade baixa entre todas as encostas estáveis. Na Eq. 4.5, é mostrado o cálculo da precisão negativa:

$$TN\ rate = \frac{TN}{FP + TN} \quad (4.5)$$

Os valores encontrados são apresentados na Tabela. 4.5:

Tabela. 4.5. Resultados da análise ROC para a metodologia HSQI

aplicada na rodovia Las Palmas

Casos verdadeiros positivos (TP)	56
Casos falsos positivos (FP)	23
Casos verdadeiros negativos (TN)	31
Casos falsos negativos (FN)	1
<i>FP rate</i>	43%
<i>TP rate</i>	98%
<i>TN rate</i>	57%

Com estes valores, pode ser feita a comparação com os métodos de SHIA-LANDSLIDE e SHALLSTAB (Aristizábal, 2013). Na Tabela 4.6, são mostrados esses resultados.

SHIA-LANDSLIDE (Aristizábal, 2013) é um modelo que permite determinar a suscetibilidade aos deslizamentos deflagrados por chuvas para bacias hidrográficas e SHALLSTAB (Montgomery & Dietrich, 1994) é um modelo similar, que permite avaliar a suscetibilidade a deslizamentos superficiais.

Pode-se ver que, com respeito aos valores de *FP rate* a metodologia HSQI ainda deve melhorar a sua avaliação, para diminuir os casos falsos positivos – ou seja, diminuir a percentagem de encostas classificadas erradamente como suscetíveis a deslizamento.

Tabela 4.6. Análise ROC das metodologias HSQI, SHIA-LANDSLIDE e SHALLTAB

ANÁLISE ROC	METODOLOGIA HSQI	SHIA-LANDSLIDE	SHALLSTAB
<i>FP rate</i>	43%	22%	21%
<i>TP rate</i>	98%	77%	29%
<i>TN rate</i>	57%	76%	79%

Nos valores de *FP rate* e *TP rate*, a metodologia HSQI está melhor que as outras metodologias, mas deve-se tentar equilibrar esses valores – ou seja, que a percentagem de encostas classificadas corretamente como suscetíveis esteja equilibrada com a percentagem das classificadas corretamente como pouco suscetíveis.

#### 4.10. GRÁFICO DE DESEMPENHO E DE RECOMENDAÇÕES

Depois de considerar os dados de campo em conjunto para avaliar a metodologia, foram analisados os diferentes tratamentos observados na rodovia Las Palmas e a sua relação com o HSQI e a altura da encosta.

O fator de correção de altura para as encostas da estrada Las Palmas é 1,0, por ser uma rodovia permanente com previsão de fluxo médio.

Com esses dados, foi proposto um gráfico de recomendações, como se pode ver na Figura 4.15, no qual existem três zonas diferenciadas (Zona I, Zona II e Zona III), definidas, principalmente, pelo índice de qualidade HSQI – alto para a Zona I, médio para a Zona II e baixo para a Zona III.

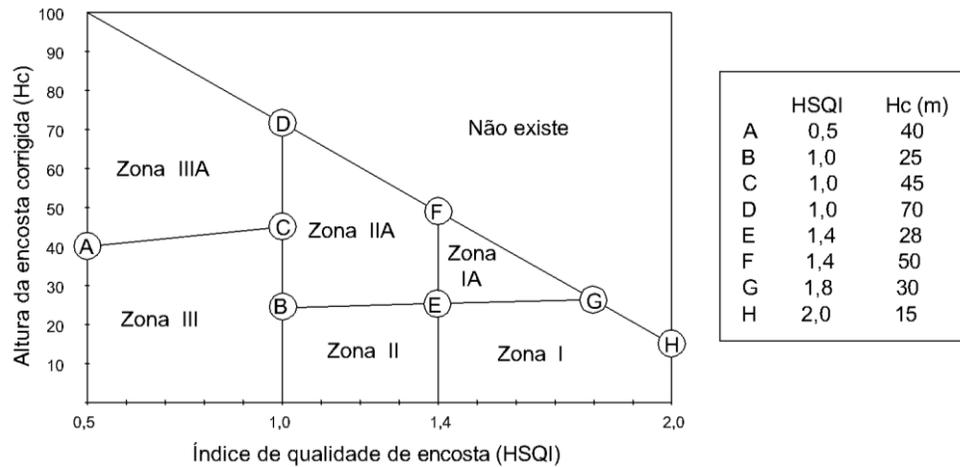


Figura 4.15. Gráfico de recomendações

Na Tabela 4.7, são descritas as recomendações de obras para cada uma das zonas.

Tabela 4.7. Recomendações de obras de tratamento para encostas

Qualidade da encosta		Recomendações	Tipos de obras
HSQI baixo	Zona III	Sistemas de estabilização conjuntos mais drenagem superficial e subsuperficial	Muros de concreto armado Concreto projetado Muros de gravidade (gaviões) Canaletas transversais e longitudinais Filtros horizontais Malhas
	Zona IIIA		Cortinas ancoradas Muros de concreto armado Bermas Malhas Canaletas transversais e longitudinais Filtros horizontais

HSQI médio	Zona II	Sistemas de estabilização mais drenagem superficial e subsuperficial	Revegetação Geossintéticos Concreto projetado Canaletas transversais e longitudinais
	Zona IIA		Muros de concreto armado Muros de gravidade (gaviões) Concreto projetado Malhas Canaletas transversais e longitudinais Filtros horizontais
HSQI alto	Zona I	Controle de erosão e drenagem	Revegetação Geossintéticos Canaletas transversais e longitudinais
	Zona IA		Revegetação Canaletas transversais e longitudinais

Para estabelecer uma definição acertada dos tratamentos recomendados para cada zona, foi realizada uma comparação com os que foram encontrados em campo. A seguir, são mostrados os gráficos para os grupos de tratamentos observados.

Na Figura 4.16, é mostrado o gráfico de recomendações para as encostas que tinham muros de concreto armado ou gaviões:

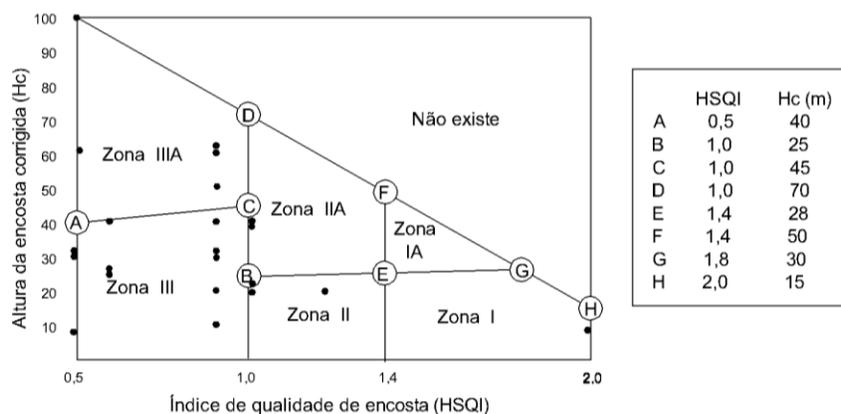


Figura 4.16. Gráfico de recomendações e de desempenho para as encostas com muros de concreto armado ou gaviões

Se pode ver na Figura 4.6 se pode ver que os pontos representam todas as encostas observadas em campo, caracterizadas por um índice de qualidade de encosta HSQI e uma altura corrigida Hc. Estes dados se podem encontrar mais detalhados no Anexo 3.

Na Figura 4.17, é mostrado o gráfico de recomendações para as encostas que tinham cortinas ancoradas e concreto projetado:

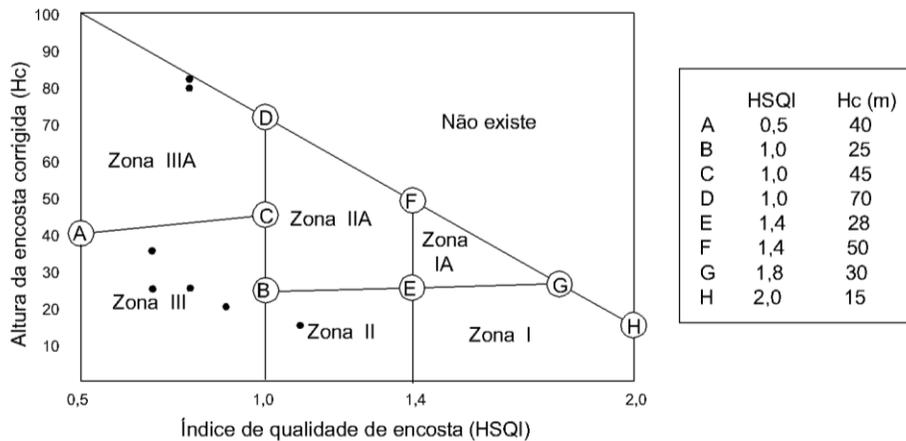


Figura 4.17. Gráfico de recomendações e de desempenho para as encostas com cortinas ancoradas e concreto projetado

Na Figura 4.18, é mostrado o gráfico de recomendações para as encostas que tinham drenagem subsuperficial e filtros horizontais:

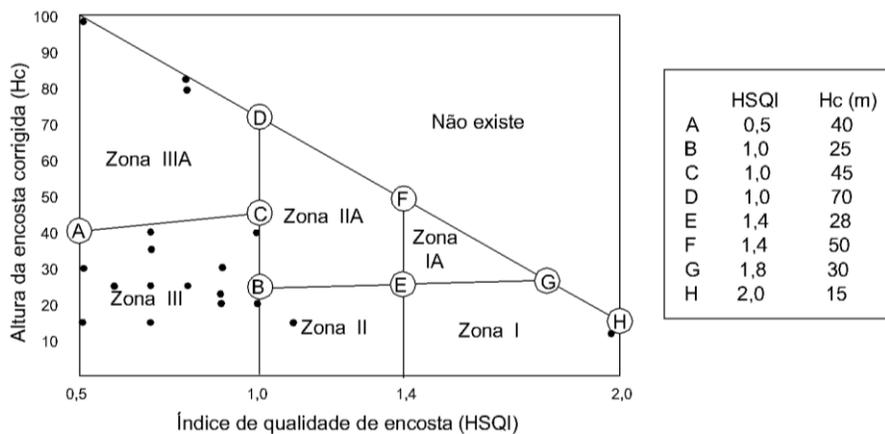


Figura 4.18. Gráfico de recomendações e de desempenho para as encostas com drenagem subsuperficial e filtros horizontais

Na Figura 4.19, é mostrado o gráfico de recomendações para as encostas que tinham drenagem superficial:

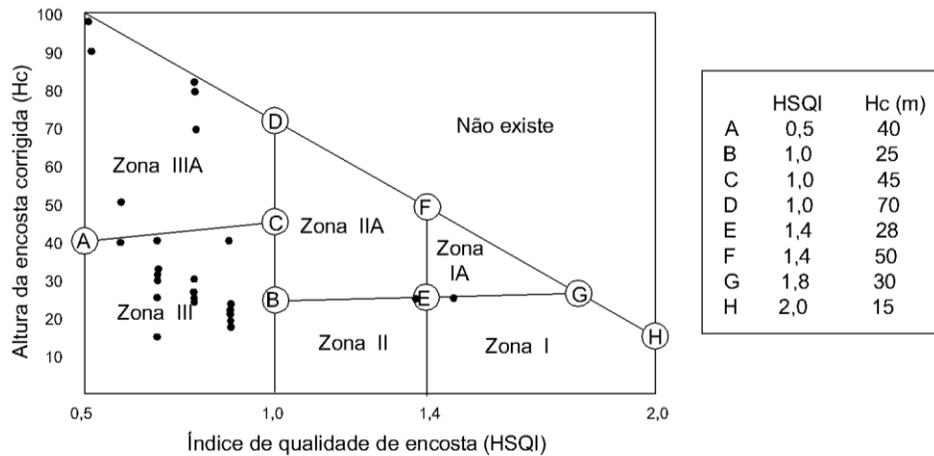


Figura 4.19. Gráfico de recomendações e de desempenho para as encostas com drenagem superficial

As recomendações propostas nos gráficos anteriores foram feitas com base no observado na estrada Las Palmas e podem servir como guia para o projeto de rodovias em condições similares e em etapas preliminares, mas devem ser submetidas a uma análise mais profunda nas etapas de projeto detalhado e final.

## **5. ANÁLISE ESTATÍSTICA E EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA HSQI**

No capítulo anterior, foi avaliada a metodologia na estrada Las Palmas e foram apresentados os passos dessa avaliação, desde a coleta de informação (passando pelo trabalho de campo e pelas análises dos dados de campo) até o produto final, que é o gráfico de recomendações de sistemas de tratamento para encostas, dependendo da qualidade HSQI.

Neste capítulo, são apresentados os resultados da análise estatística do índice de qualidade de encosta HSQI dependendo da variabilidade das propriedades geotécnicas encontradas em campo e também um exemplo da aplicação da metodologia HSQI de acordo com a perspectiva do usuário, na Estrada Nacional 25, no setor La Pintada – La Felisa, na Colômbia.

### **5.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA PELO MÉTODO DE ESTIMATIVAS PONTUAIS DA VARIÁVEL HSQI**

O método de estimativas pontuais (Rosenblueth, 1975) permite analisar a distribuição de probabilidades de uma variável dependente em função do conhecimento das distribuições de probabilidades das variáveis independentes desconhecidas que a geram.

O método de estimativas pontuais consiste em estimar os momentos de ordem inferior, média e desvio padrão da variável dependente conhecendo esses mesmos momentos das variáveis aleatórias independentes, sem a necessidade de conhecer as distribuições de probabilidade completas nem das variáveis independentes ou da dependente.

Neste caso, a variável dependente é o índice de qualidade de encosta HSQI, que depende de duas variáveis independentes, que são os parâmetros geotécnicos – ângulo de atrito  $\phi$  e coesão  $c$  –, das quais se conhecem a sua média e o desvio padrão.

O peso específico ( $\gamma$ ) não foi tomado como uma variável devido ao coeficiente de variação de 5%, o qual é muito pequeno (Farias & Assis, 1998).

Na Tabela 5.1, são mostrados os momentos estatísticos dos parâmetros geotécnicos das diferentes formações superficiais encontradas ao longo da estrada Las Palmas, com os quais foi desenvolvida a análise de HSQI, onde  $\mu$  é o valor médio e  $\sigma$  é o desvio padrão de cada parâmetro.

Tabela 5.1. Momentos estatísticos dos parâmetros geotécnicos atrito  $\phi$  e coesão  $c$

Nom.	Formação superficial	$\mu c$ (kPa)	$\mu\phi$ (°)	$\sigma_c$ (kPa)	$\sigma_\phi$ (°)
QdII	Solos derivados de fluxos de lamas e/ou detritos	19	23	11,5	8,2
TQsrs	Solos residuais derivados do <i>Stock</i> de San Diego	17	30	15,1	8,3
Tqsra	Solos residuais derivados de anfibólitos de Medellín	25	28	13,6	5,6
TQsrd	Solos residuais derivados de dunitos de Medellín	34	25	10,2	2,5
TQsrm	Solos residuais de migmatitos de Puente Peláez	25	38	7,5	3,8
QdII	Depósitos de deslizamento	14	21	10,5	3,5

Para aplicar este método, é avaliado o HSQI para quatro condições:

- HSQI com  $\mu c + \sigma_c$  e  $\mu\phi + \sigma_\phi$ .
- HSQI com  $\mu c + \sigma_c$  e  $\mu\phi - \sigma_\phi$ .
- HSQI com  $\mu c - \sigma_c$  e  $\mu\phi + \sigma_\phi$ .
- HSQI com  $\mu c - \sigma_c$  e  $\mu\phi - \sigma_\phi$ .

Depois de obtidos os resultados, são feitas as análises estatísticas com todos os valores.

Na Tabela 5.2, são mostrados alguns resultados das análises estatísticas de estimativas pontuais feitas para a variável de índice de qualidade. A tabela completa encontra-se no Anexo 5. Podem-se ver os quatro casos e os valores da média e do desvio padrão de HSQI, assim como a probabilidade de ruptura de cada uma das encostas.

Tabela 5.2. Análise de estimativas pontuais na variável HSQI

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4			
Localização	HSQI 1	HSQI 2	HSQI 3	HSQI 4	$\mu$ HSQI	$\sigma$ HSQI	Probabilidade HSQI < 1
km 0+100	1,1	0,7	0,6	0,5	0,7	0,21	90%
km 0+200	1,4	0,9	0,9	0,5	0,9	0,31	62%
km 0+300	1,3	0,9	0,8	0,5	0,9	0,31	65%
km 0+400	0,9	0,6	0,5	0,5	0,6	0,18	98%
km 0+500	1,2	0,8	0,7	0,5	0,8	0,24	80%
km 0+600	2,0	1,5	0,9	0,5	1,4	0,58	33%
km 0+700	-	-	-	-	-	-	-
km 0+800	1,2	0,8	0,5	0,5	0,7	0,28	82%
km 0+900	1,3	0,9	0,5	0,5	0,8	0,33	72%
km 1+000	1,4	1,0	0,5	0,5	0,9	0,38	65%
km 1+100	1,0	0,5	0,5	0,5	0,6	0,21	96%
km 1+200	1,8	1,2	0,9	0,6	1,2	0,46	37%
km 1+300	1,2	0,9	0,5	0,5	0,6	0,29	82%
km 1+400	1,0	0,7	0,5	0,5	0,6	0,19	97%

Pode-se supor que o parâmetro que mais influi na variabilidade do valor de HSQI é a coesão  $c$ , pois essa propriedade tem mais dispersão que a variável de ângulo de atrito  $\phi$ .

É possível também ver que, para valores de HSQI altos – maiores que 1,4 –, as probabilidades de que o índice de qualidade seja menor que 1,0 são menores.

Na Tabela 5.3, podem ser vistos os resultados das probabilidades médias de ruptura para as encostas de cada categoria de HSQI.

Tabela 5.3. Resultados da análise probabilística das categorias do HSQI

Classificação HSQI	Probabilidade média de ruptura
Encostas com suscetibilidade alta	82%
Encostas com suscetibilidade média	41%
Encostas com suscetibilidade baixa	13%

Considerando a ruptura como o HSQI menor que o valor de 1 – ou seja, o limite da categoria de suscetibilidade baixa –, as três categorias de classificação propostas pelo método HSQI para encostas de suscetibilidade a deslizamento alta, média e baixa apresentam, depois da análise estatística das 129 encostas da rodovia Las Palmas, probabilidades médias de ruptura de 82%, 41% e 13%, respectivamente.

## 5.2. APLICACÃO DA METODOLOGIA HSQI À ESTRADA LA PINTADA – LA FELISA

A seguir, é apresentado um exemplo, passo a passo, da aplicação da metodologia HSQI.

A aplicação foi realizada com dados de um inventário de deslizamentos na Estrada Nacional 25, no setor La Pintada – La Felisa, feito pelos alunos do Mestrado em Geotecnia da *Universidad Nacional de Colombia* – UNAL, na Colômbia.

### 5.2.1. LOCALIZAÇÃO DA ZONA

A estrada La Pintada – La Felisa está localizada no sudoeste do departamento de Antioquia. Pertence à Rodovia Nacional 25. A análise de HSQI foi feita em um comprimento de 5km, desde o km 28+300 até o km 31+700 (tomado desde o município de La Pintada). Na Figura 5.1, é apresentada a localização da estrada em estudo junto com a via Las Palmas:

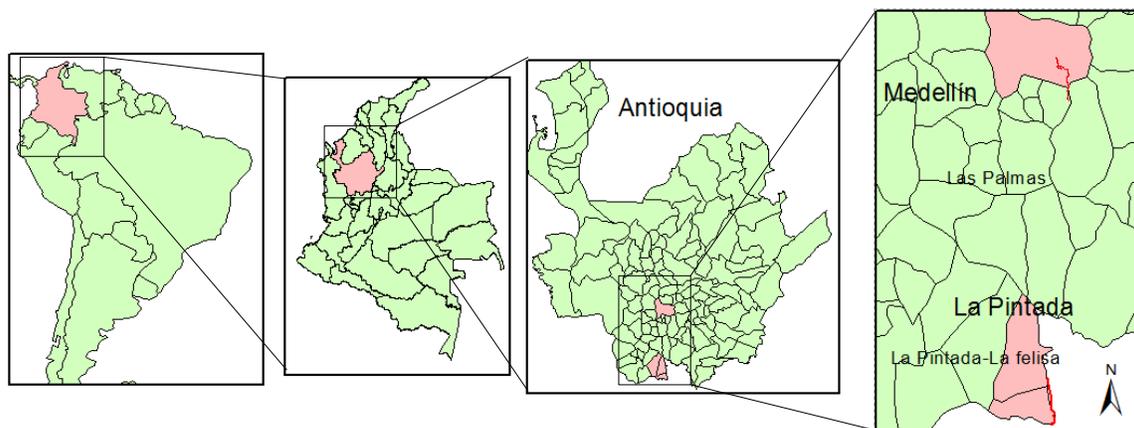


Figura 5.1. Localização da estrada La Pintada – La Felisa

### 5.2.2. CARACTERÍSTICAS DA ZONA

A estrada encontra-se em uma das margens do rio Cauca, a uma altitude de 600m, em uma zona com temperatura média de 27°C e precipitação média anual de 1.000mm, com regime bimodal.

A zona encontra-se dentro da formação de xistos anfibólicos do rio Cauca, caracterizada pela presença de anfibolitos vermelhos e xistos verdes e pretos (*Gobernación de Antioquia, 2009*). Esse tipo de litologia é encontrado em afloramentos de rocha muito fraturados nas encostas ao longo da estrada em estudo.

### 5.2.3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA HSQI

As análises de HSQI foram feitas a partir do inventário de deslizamentos de 13 encostas observadas fornecido pela UNAL.

Primeiro, foram definidas as zonas, tendo como base o eixo da via e os pontos onde foram obtidos os dados das encostas.

Na Tabela 5.4, são observadas as diferentes encostas analisadas com a metodologia HSQI, a sua localização e também as suas propriedades geométricas:

Tabela 5.4. Zoneamento da estrada La Pintada – La Felisa

<b>Encosta</b>	<b>Localização</b>	<b>H (m)</b>	<b>i (°)</b>
E1	km 31+700	8	60
E2	km 31+500	15	60
E3	km 31 + 200	15	65
E4	km 31 +100	15	65
E5	km 30 + 800	30	65
E6	km 30 + 500	-	-
E7	km 30 + 300	20	70
E8	km 30 + 100	30	70
E9	km 29 + 800	50	78
E10	km 29 + 200	-	-
E11	km 28 + 600	20	45
E12	km 28 + 400	30	60
E13	km 28 + 300	50	40

Depois feito o zoneamento, começou a análise de HSQI para cada zona, à exceção das encostas E6 e E10, das quais não foi possível obter dados.

A seguir, é apresentado exemplo da análise de estabilidade da encosta localizada no ponto E1. Na Figura 5.2, é mostrada uma fotografia da encosta E1, localizada no km 31+700:



Figura 5.2. Encosta E1

Segundo os dados fornecidos pela UNAL, as características da encosta são mostradas na Tabela 5.5:

Tabela 5.5. Características da encosta E1

Encosta	E1	
H (m)	8	
i (°)	60	
Geologia	Xistos verdes	
c (kPa)	22	
$\phi$ (°)	30	
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	21	
b (m)	20 - 25	
Orientação	54°NE	
Principais estruturas	D1	190\55
	D2	120\75
	E	270\35

Com uma análise estereográfica, foram encontrados os ângulos de mergulho aparentes  $\beta$  das estruturas D1, D2 e E na seção do talude, como se mostra na Figura 5.3:

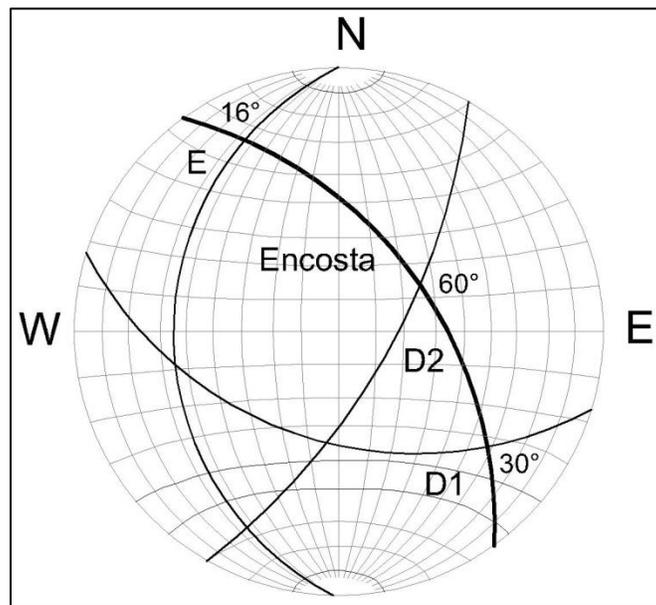


Figura 5.3. Análise estereográfica da encosta.

- O ângulo aparente  $\beta$  da estrutura D1 foi de  $30^\circ$ .
- O ângulo aparente  $\beta$  da estrutura D2 foi de  $60^\circ$ .
- O ângulo aparente  $\beta$  da estrutura E foi de  $16^\circ$ .

Para fazer a análise de HSQI, foi escolhida a estrutura D1, já que o ângulo aparente  $\beta$  de  $30^\circ$  é o mais desfavorável para a estabilidade da encosta é o da estrutura D2.

A geometria da encosta E1 é mostrada na Figura 5.4:

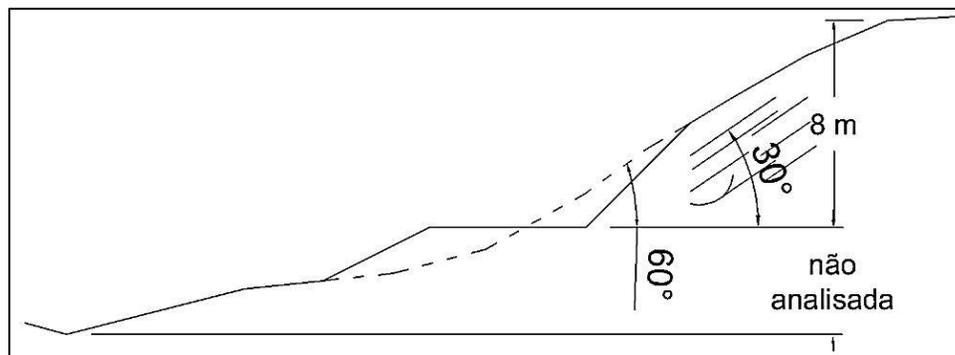


Figura 5.4. Geometria da encosta E1

Com essas características geotécnicas e geométricas, pôde ser realizada a análise de estabilidade mediante as funções X e Y.

A função X depende da inclinação da encosta  $i$  e do ângulo aparente  $\beta$ :

$$X = 2\sqrt{(i - \beta)(\beta - \varphi)} \quad (5.1)$$

Neste caso:

$$X = 2\sqrt{(60^\circ - 30^\circ)(30^\circ - 30^\circ)} = 0 \quad (5.2)$$

A função Y depende do peso específico  $\gamma$ , da coesão  $c$  e do ângulo de atrito  $\varphi$  do material da encosta:

$$Y = \frac{21 \text{ kN}/\text{m}^3 * 8 \text{ m}}{22 \text{ kN}/\text{m}^2} = 7,6 \quad (5.3)$$

Com esses valores das funções, foi consultada a carta de deslizamento controlado estruturalmente e encontrado o valor de HSQI, como é mostrado na Figura 5.5:

O HSQI foi de 2,0, devido a ser o valor que satura a carta. O que quer dizer que essa zona pode ser classificada como de suscetibilidade a deslizamento baixa.

Depois de classificar a zona representada pela encosta E1, pôde-se prosseguir para o gráfico de recomendações, corrigindo-se, primeiro, a altura.

A Estrada Nacional 25 é uma estrada tipo IV – ou seja, é permanente, com previsão de fluxo alto. Portanto, o fator de correção para as encostas é de 0,80.

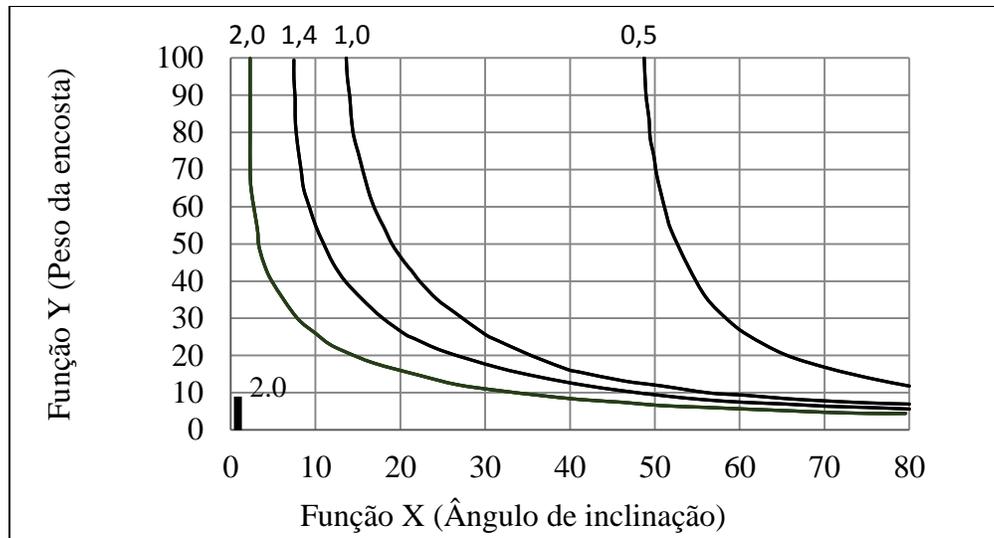


Figura 5.5. Cálculo do HSQI para a encosta E1

Na Tabela 5.6, são mostrados todos os fatores de correção para a altura das encostas, dependendo da importância da estrada:

Tabela 5.6. Fator de correção dependendo da importância da estrada

<i>Tipo</i>	<i>Importância da estrada</i>	<i>Fator de correção (FC)</i>
I	Temporária	1,5
II	Permanente, com previsão de pouco fluxo veicular	1,3
III	Permanente, com previsão de fluxo veicular médio	1,0
<b>IV</b>	<b>Permanente, com previsão de fluxo veicular alto</b>	<b>0,8</b>
V	Fundamental, com previsão de fluxo veicular alto	0,6

A altura da encosta E1 é corrigida pelo FC 0,8, de maneira que a altura corrigida da encosta é 10m.

$$H_c = \frac{H}{FC} = \frac{8 \text{ m}}{0,8} = 10 \text{ m}$$

(5.4)

Com a altura corrigida de 10m e o HSQI de 2,0, prosseguiu-se para o gráfico de recomendações, como é mostrado na

Figura 5.6:

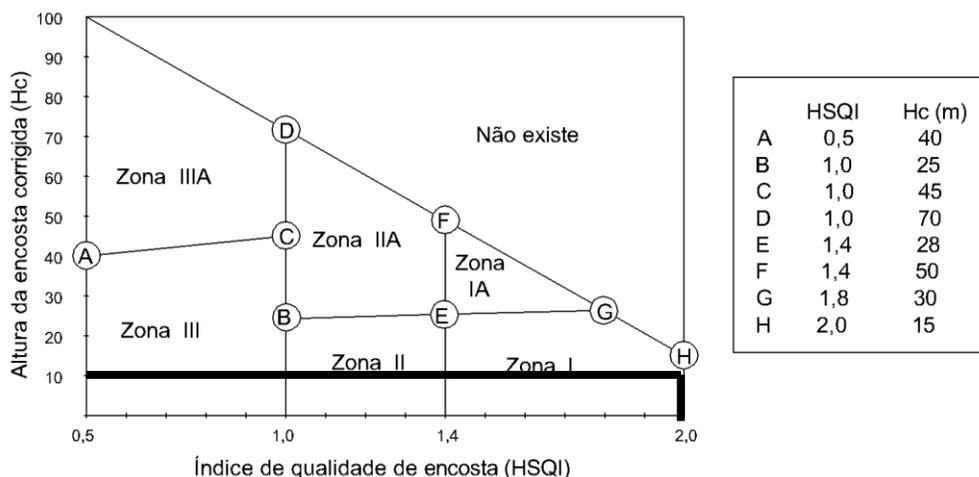


Figura 5.6. Gráfico de recomendações

A encosta E1 encontra-se na Zona I. Portanto, as recomendações propostas são revegetação, canaletas transversais e longitudinais.

O processo apresentado anteriormente foi realizado para todas as encostas, tendo como resultado a Tabela 5.7:

Tabela 5.7. Resultados da análise HSQI para a estrada La Pintada – La Felisa.

Encosta	Geologia	Tipo de desliz.	H (m)	i (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	$\beta$ (°)	Função		HSQI	inst.
									X	Y		
E1	Xisto verde	planar	8	60	21	22	30	30	0	7,6	2,0	
E2	Xisto verde	circular	15	60	21	22	30	-	24	14	1,0	x
E3	Xisto verde	planar	15	65	21	22	30	60	24	14	2,0	
E4	Xisto verde	planar	15	65	21	22	30	55	32	14	1,6	x
E5	Depósito de deslizamento	circular	30	65	21	22	30	-	29	29	0,6	x
E7	Xisto azul	planar	20	70	21	22	30	42	37	19	1,0	x
E8	Xisto	planar	30	70	21	22	30	60	35	29	0,8	x
E9	Xisto	planar	50	78	21	22	30	36	32	48	0,7	x
E11	Andesito	planar	20	65	21	22	30	40	32	19	1,2	x
E12	Andesito	planar	30	60	21	22	30	35	22	29	1,3	x
E13	Andesito	planar	50	40	21	22	30	35	10	48	0,8	x

E, finalmente, o zoneamento final da estrada pode ser observado na Tabela 5.8:

Tabela 5.8. Zoneamento da estrada La Pintada – La Felisa

Encosta	HSQI	H <sub>c</sub> (m)	Zona
E1	2,0	10	I
E2	1,0	19	III
E3	2,0	19	I
E4	1,6	19	I
E5	0,6	38	III
E7	1,0	25	III
E8	0,8	38	III
E9	0,7	63	IIIA
E11	1,2	25	II
E12	1,3	38	IIA
E13	0,8	63	IIIA

Tendo esses resultados, podemos compará-los com o observado em campo.

A encosta E4 tem um HSQI de 1,6, índice de qualidade alto – ou seja, suscetibilidade ao deslizamento baixa. Em campo, encontra-se estável, como se pode ver na Figura 5.7. Porém, observou-se também evidência de quedas de blocos de pequeno tamanho, devido ao grau de faturamento do maciço. Segundo o gráfico de recomendações, propõe-se como tratamento para essa encosta uma malha e ancoragem para controle de queda de blocos e melhora da estabilidade, e obras de controle de erosão.

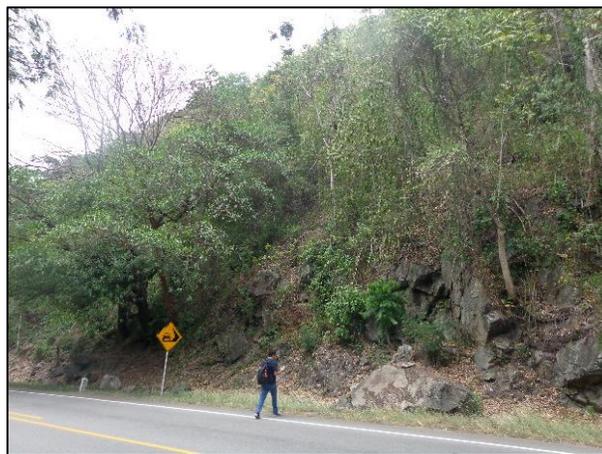


Figura 5.7. Encosta E4 no km 31+100

A encosta E5 tem um HSQI de 0,6, índice de qualidade baixo – ou seja, suscetibilidade ao deslizamento alta. Em campo, foram encontradas evidências de processos de escorregamento. No topo da encosta, observou-se uma antiga cicatriz de deslizamento circular, como se pode ver na Figura 5.8. Segundo o gráfico de recomendações, essa encosta encontra-se na Zona III. Então, propõe-se um tratamento com um muro de contenção de concreto armado para melhorar a estabilidade, filtros horizontais e canaletas na parte inferior da encosta.

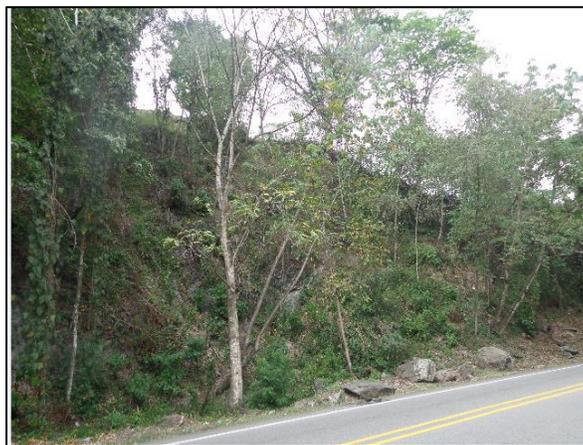


Figura 5.8. Encosta E5 no km 30+800

A encosta E7 tem um HSQI de 1,0 – ou seja um índice de qualidade baixo e suscetibilidade ao deslizamento alta. Em campo, foi possível ver que, atualmente, encontra-se estável. Mas, se evidencia instabilidade por queda de blocos, alguns dos quais se encontram depositados na margem da via, como se pode ver na Figura 5.9. Segundo o gráfico de recomendações, a encosta encontra-se na Zona III. Então, propõe-se uma malha ancorada para controle de queda de blocos.



Figura 5.9. Encosta E7 no km 30+300

A encosta E8 tem um HSQI de 0,8, que a classifica como uma encosta de baixa qualidade e suscetibilidade alta ao deslizamento. Em campo, isso foi comprovado, já que efetivamente apresenta instabilidade, como se pode observar na Figura 5.10. Segundo o gráfico de recomendações, recomenda-se tratar com concreto projetado e filtros horizontais, já que a zona onde se encontra a encosta é a III.



Figura 5.10. Encosta E8 no km 30+100

A encosta E9 tem um HSQI de 0,6 – ou seja, um índice de qualidade muito baixa. Na Figura 5.11, pode-se ver que a encosta tem uma cicatriz de um deslizamento. Segundo o gráfico de recomendações, essa encosta encontra-se na Zona IIIA. Então, poderia ser recomendada uma cortina ancorada. Mas, como existe presença de alteração hidrotermal, essa solução não é viável, pois a drenagem ácida afetaria o concreto e o aço da cortina. Deve-se, portanto, procurar outra solução, mais específica, para essa encosta. O que requer estudos mais profundos, como, por exemplo, verificar se existe uma falha ativa na zona que tenha o potencial de gerar processos hidrotermais na encosta.



Figura 5.11. Encosta E9 no km 29+800

A encosta E11 tem um HSQI de 1,2, o que a classifica como encosta com qualidade média e suscetibilidade média ao deslizamento. Na Figura 5.12, pode-se ver que atualmente está estável. Há, porém, um depósito de grandes blocos devido a um evento de instabilidade no passado. Para essa encosta recomenda-se uma malha ancorada e controle de erosão.



Figura 5.12. Encosta E11 no km 28+600

A encosta E13 tem um HSQI de 0,8, baixo e uma suscetibilidade alta ao deslizamento. Na Figura 5.13, pode-se ver que há uma cicatriz de deslizamento e materiais depositados na base da encosta. Recomenda-se como tratamento uma malha ancorada.



Figura 5.13. Encosta E13 no km 28+300

Da análise anterior, pode-se concluir que, na maioria das encostas, o classificador HSQI correspondeu à condição de estabilidade real da encosta e, com a metodologia, foi possível propor diferentes soluções para a estabilidade da maioria delas – com exceção da encosta E9, que apresenta alteração hidrotermal e, portanto, precisa de uma análise específica.

Na Figura 5.14, pode-se ver o zoneamento final dos 5km da estrada La Pintada – La Felisa:

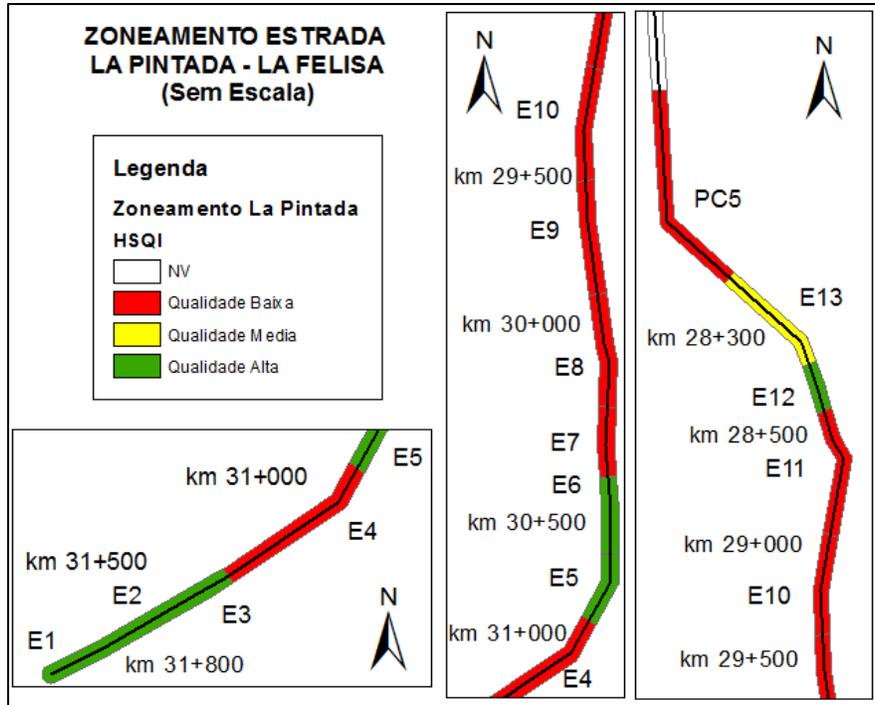


Figura 5.14. Zoneamento da estrada La Pintada–La Felisa

## **6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões da pesquisa e as recomendações para futuras pesquisas no campo das classificações geotécnicas de rodovias.

### **6.1. SOBRE A APLICAÇÃO DO HSQI PELO USUÁRIO**

A metodologia HSQI é apresentada como um processo simples para analisar a qualidade das encostas ao longo das estradas, o que é muito útil no planejamento dos projetos de rodovias. O método permite fazer uma previsão ou estimação dos custos das obras de estabilização de acordo com a quantidade de setores classificados com qualidade baixa, permitindo assim verificar a viabilidade do projeto e a tomada de decisões com respeito ao traçado. No Capítulo 5, por exemplo, foram feitas recomendações de obras de tratamento para cada uma das encostas analisadas nos 5km da Estrada Nacional 25 entre La Pintada e La Felisa. Tendo em conta os custos gerais de cada tratamento – como, por exemplo, o metro de malha, a ancoragem e o metro linear de muro de concreto armado –, poderia ser feita uma estimativa do orçamento para esse trecho da rodovia.

A análise de estabilidade de encostas para obter o índice de qualidade HSQI é feita em condições estáticas. A análise em condições dinâmicas ou de sismo não foi incluída com base no critério de que um evento sísmico de magnitude moderada ( $M_0$  entre 5,0 e 5,9) ou menor geralmente só afeta as encostas que já são suscetíveis a deslizamento em condições estáticas e o sismo só é o elemento detonador. Outra razão considerada é que, para etapas preliminares, uma análise sísmica pode fornecer valores muito conservadores, os quais afetam a classificação final e o custo das recomendações para tratamento das encostas.

A metodologia de classificação HSQI é aplicável apenas para uma análise preliminar, que permite avaliar a qualidade das encostas de uma rodovia, mas não substitui uma análise detalhada de estabilidade de taludes, nem os estudos necessários para projetar as obras requeridas de estabilização.

## 6.2. SOBRE A AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO HSQI

Foi feita uma comparação entre o índice de qualidade de encosta HSQI e o fator de segurança calculado por um programa de equilíbrio limite, e os resultados para valores baixos de qualidade de encosta foram muito similares, com algumas diferenças apreciáveis nos valores mais altos de HSQI, em razão da saturação desse índice no valor de 2,0. Então, conclui-se que o HSQI é útil para fazer uma estimativa preliminar do comportamento de estabilidade da encosta.

A aplicação da metodologia HSQI tem como principal vantagem o fato de conseguir obter uma classificação da qualidade das encostas em relação à sua estabilidade ao longo de uma estrada, sem utilizar parâmetros de um trabalho detalhado em campo para cada encosta.

Segundo os resultados obtidos na avaliação da metodologia HSQI mediante a análise ROC, tem-se uma taxa de estimativa (*TP rate*) de 98% e uma taxa de falsos negativos (*FN rate*) de 57%. Resultados que mostram que a metodologia é muito acertada para prever uma qualidade baixa das encostas, mas que ainda é preciso melhorar os resultados com respeito à taxa de falso alarme (*FP rate*), que foi de 43% – ou seja, muito alta.

Os valores das três categorias de classificação da metodologia foram propostos arbitrariamente, segundo o critério do autor. Mas, com as análises das 129 encostas da rodovia Las Palmas, em Medellín, foram determinados os valores de HSQI de 1,0 como limite para a categoria de suscetibilidade baixa a média e de 1,4 como o limite da categoria média a alta.

Com a análise probabilística, utilizando o método de estimativas pontuais, determinou-se que as encostas que pertencem à categoria de encostas suscetíveis têm uma probabilidade média de ruptura de 80%, aproximadamente; as encostas que pertencem à categoria média têm uma probabilidade média de ruptura de 40%, aproximadamente; e as encostas dentro da categoria baixa têm uma probabilidade de ruptura de 10%, aproximadamente. Isso demonstra que os valores escolhidos de HSQI 1,0 e 1,4, como limites das categorias baixa a média e média a alta, respectivamente, efetivamente estão em concordância com os dados de campo.

### 6.3. RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- O gráfico de recomendações proposto nesta dissertação foi desenvolvido tendo em conta as observações de campo feitas na rodovia Las Palmas, na cidade de Medellín, a qual, segundo o critério do autor, tem um nível de importância médio. Portanto, o fator para corrigir a altura foi de 1,0. Recomenda-se, então, calibrar o gráfico de recomendações com fatores de correção diferentes – ou seja, com vias de níveis de importância diferentes – para tornar esta metodologia mais ampla e abrangente.
- A aplicação da metodologia foi feita em duas regiões da Colômbia com climas similares (regime bimodal), mas com precipitação média anual diferente, dando como resultados os apresentados anteriormente. Esperava-se que, em regiões com maior precipitação, os valores de HSQI fossem menores e, em regiões mais secas, os valores de HSQI fossem maiores. Assim, seria necessário adicionar um fator de correção ao HSQI que levasse em conta o fator clima. Portanto, recomenda-se aplicar a metodologia HSQI em regiões com climas diferentes.
- Recomenda-se realizar um estudo de custos das principais obras de tratamento de taludes e encostas para adicionar e complementar a metodologia HSQI com uma tabela de custos, a ser trabalhada junto com a tabela de recomendações de obras, para determinar, desde a metodologia, um orçamento preliminar dos tratamentos geotécnicos da estrada.
- Recomenda-se realizar uma comparação das metodologias de classificação de taludes, como o *Slope Mass Rating* (SMR – M. R. Romana, 1993), o *Slope Quality Index* (SQI – Pinheiro *et al.*, 2015), a metodologia Mora-Vharson-Mora (Mora, 2004) e a metodologia simplificada de avaliação da vulnerabilidade de aterros em estradas de montanha (Calderón & Monge, 2007) com a metodologia HSQI para achar pontos em comum e de divergência e assim enriquecer o método proposto.

- Recomenda-se aplicar e avaliar a metodologia HSQI na rodovia Las Palmas de novo mas variando o clima, ou seja, segundo a previsão da mudança do nível de precipitação no futuro, analisar como altera o comportamento e desempenho das encostas. Essas mudanças podem ser introduzidas no modelo de análise proposto nos casos A a F dependendo das condições do lençol freático. Esperasse que si as condições de precipitação aumentam na região o índice de qualidade HSQI das encostas seja menor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amva. (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de barbosa, girardota, copacabana, sabaneta, la estrella, caldas y envigado, informe final Área metropolitana del Valle de Aburrá, publicación institucional, Medellín, Còlombia, pp. 745.
- Aristizábal, E. (2013). SHIA - Landslide : Developing a physically based model to predict shallow landslides triggered by rainfall in tropical environments. Thesis. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Còlombia. 223 p.
- Aristizábal, E. & Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el valle de aburrá. *Gestión y Ambient. Medellín, Còlombia.*, 10(2): 17–30.
- Barquero, A. (2012). Metodología de análisis de estabilidad de taludes para proyectos viales. XI congreso Nacional de Geotécnia CONGEO 2012., San José, Costa Rica.
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech. Felsmechanik Mec. des Roches*, 6: 189–236.
- Bieniaski, Z. (1993). Classification of rock masses for engineering: the rmr system and future trends J.A. Hudson ed., Pergamon, pp. 619–634.
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4(1): 71–81.
- Calderón, A. & Monge, W. (2007). Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña de costa rica. *Infraestruct. vial*, 18(1).
- Daftaribesheli, A., Ataei, M. & Sereshki, F. (2011). Assessment of rock slope stability using the fuzzy slope mass rating (fsmr) system. *Appl. Soft Comput. J.*, 11(8): 4465–4473.
- Farias, M. & Assis, A. (1998). Uma comparação entre métodos probabilísticos aplicados a estabilidade de taludes. *COBRAMSEG 2014*, 1: , 1305–1313.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to roc analysis. *Pattern Recognit. Lett.*, 27(8): 861–874.
- GEO-RIO. (1999). Manual Técnico de Encosta. 1st Ed. Fundação GEO-RIO, Rio de Janeiro.
- Gobernación de Antioquia. (2009). Perfil de la subregión del suroeste (094): 152.
- Hoek, E. & Bray, J. (1981). Circular failure. *Rock slope engineering*, Institution of mining and metallurgy, London, pp. 402.
- Liu, Y.-C. & Chen, C.-S. (2007). A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Eng. Geol.*, 89(1-2): 129–143.

- Marinos, V., Marinos, P. & Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 64(1): 55–65.
- Monge, W.V. & Mora, F.G. (2008). Relación entre las características geométricas y la vulnerabilidad de algunas rutas de montaña de costa rica. Congreso de seguridad vial LANAMME, .
- Montgomery, D.R. & Dietrich, W.E. (1994). A physically based model for topographic control on shallow landsliding. *WATER Resour. Res.*, 30(4): 1153–1179.
- Mora C, S. & Vahrson, W.-G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bull. Assoc. Eng. Geol.*, 31(1): 49–58.
- Mora, R. (2004). Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de san José, provincia de san José, costa rica. Serv. Espec. Lab. Suelos y rocas, FUNEDI. San José, Costa Rica,.
- Muñoz, E. & Martínez, H. (2013). Propiedades estadísticas de un inventario de deslizamientos en la ciudad de medellín, colombia.
- Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A. & Correia, A.G. (2015). A new empirical system for rock slope stability analysis in exploitation stage. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 76: 182–191.
- Romana, M., Serón, J.B. & Montalar, E. (2003). Smr geomechanics classification : application , experience and validation. *Rock Mech.*, 4(iii): 3–6.
- Romana, M.R. (1993). A geomechanical classification for slopes: slope mass rating. *Comprehensive Rock Engineering*, 3,.
- Rosenblueth, E. (1975). Point estimates for probability mor nents. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 72(10): 3812–3814.
- Sánchez, A.C. (1989). Apuntes de Geotécnia (Cursos de geotécnia y prácticas geotécnicas). 1st Ed. Facultad Nacional de Minas.Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Taherynia, M.H., Mohammadi, M. & Ajalloeian, R. (2014). Assessment of slope instability and risk analysis of road cut slopes in lashotor pass , iran 2014: 12.
- Tomás, R., Cuenca, a., Cano, M. & García-Barba, J. (2012). A graphical approach for slope mass rating (smr). *Eng. Geol.*, 124: 67–76.

## ANEXOS

### ANEXO 1. TABELAS DO RMRB E DO SMR

**TABELA 1. RMR<sub>B</sub> = RMR BÁSICO = Σ PESOS (BIENIAWSKY, 1997)**

PARÂMETRO	INTERVALOS						
UCS (MPa)	< 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)	100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25		
	20	17	13	8	3		
Espaçamento (mm) entre descontinuidades	> 2.000	2.000 - 600	600 - 200	2.000 - 60	< 60		
	20	15	10	8	5		
Condição das descontinuidades  Rugosidade, persistência, separação, intemperismo das paredes e recheio	Superfícies muito rugosas  Sem separação  Parede da rocha não intemperizada	Levemente rugosa  Separação < 1mm  Paredes levemente fracas	Leve rugosidade  Separação > 1mm  Paredes altamente intemperadas	Paredes escorregadiças  Separação 1 - 5mm	Recheio suave > 5mm ou separação > 5mm contínua		
	30	25	20	10	0		
Água subterrânea nas juntas (poropressão)	Completamente seco  (0)	Úmido  (0 - 0,1)	Molhado  (0,1 - 0,2)	Gotejamento  (0,2 - 0,5)	Fluxo  (0,5)		
	15	10	7	4	0		

**TABELA 2. SMR = RMR<sub>B</sub> + (F1 x F2 x F3) + F4 (ROMANA, 1985)**

FATORES DE AJUSTE POR JUNTAS (F1, F2, F3)	$\alpha_j$ = orientação do mergulho da junta $\alpha_s$ = orientação do mergulho da encosta		$\beta_j$ = mergulho da junta $\beta_s$ = mergulho da encosta		
	Muito favorável	Favorável	Médio	Desfavorável	Muito desfavorável
Planar $ \alpha_j - \alpha_s  =$	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
Tomb. $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ  =$	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Valor F1	$F1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s )^2$				
Relação					
$ \beta_j  =$	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
Valor F2 plano	0,15	0,40	0,70	0,80	1,00
Tombamento	1,00				
Relação	$F = \text{tg}^2 \beta_j$				
Plano $ \beta_j - \beta_s  =$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< (-10^\circ)$
Tomb. $ \beta_j + \beta_s  =$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
Valor F3	0	-6	-25	-50	-60
Relação	F3 (Valores de ajuste para orientação de juntas por Bieniawsky, 1976)				
F4 Fator de ajuste por método de escavação	F4 = Valores empíricos pelo método de escavação				
Valor F4	Talude natural	<i>Presplitting</i>	Jateamento suave	Jateamento ou mecânico	Jateamento deficiente
	+15	+10	+8	0	-8

**TABELA 3. RECOMENDAÇÕES DE SISTEMAS DE SUPORTE**

SMR	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Ré escavação			Paredes reescavadas								
Drenagem			Drenagem superficial e subsuperficial								
Concreto			Concreto lançado, concreto dental, vigas e contrafortes								
Reforço				Ancoragem							
Proteção					Malhas						
Sem suporte								Nenhum tratamento			

## ANEXO 2. TABELAS DETALHADAS DO SQI

<b>TABELA 1. VALORES E PESOS SQI</b>							
<b>Fatores</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Categorias e pesos</b>					
<b>Geometria</b> 0,17	<b>Altura do talude (m)</b>	<b>&lt; 10</b>	<b>10 - 20</b>	<b>20 - 30</b>	<b>20 - 30</b>	<b>&gt; 40</b>	
	0,50	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto	
	Peso	1	2	3	4	5	
	<b>Ângulo do talude (°)</b>	<b>&lt; 30</b>	<b>30 - 40</b>	<b>41 - 50</b>	<b>51 - 60</b>	<b>&gt; 60</b>	
	0,35	Muito pouco	Pouco	Médio	Inclinada	Muito inclinada	
Peso	1	2	3	4	5		
<b>Ângulo da berma</b>		<b>Correto</b>	<b>Incorreto</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	
0,15							
Peso		1 - 2	4 - 5	-	-	-	
<b>Largura da berma (m)</b>		<b>0 - 1</b>	<b>1 - 2</b>	<b>2 - 3</b>	<b>3 - 4</b>	<b>&gt; 4</b>	
0,25							
Peso		5	4	3	2	1	
<b>Geológico</b> 0,14	<b>Tipo de formação</b>	<b>Tipo</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
	0,40						
	Peso		1	2	3	4	5
	<b>Grau de intemperismo (W)</b>	<b>Intato (W = 1)</b>	<b>Levemente (W = 2)</b>	<b>Moderado (W = 3)</b>	<b>Altamente (W = 4)</b>	<b>Descomposto (W = 5)</b>	
	0,30						
	Peso	1	2	3	4	5	
	<b>Falhas</b>	<b>Existe</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	
	0,30						
	Peso	4 - 5	-	-	-	-	
	<b>Blocos</b>	<b>RHRSm2</b>	<b>&lt; 51</b>	<b>52 - 153</b>	<b>52 - 333</b>	<b>333 - 459</b>	<b>&gt; 459</b>
0,20							
Peso		1	2	3	4	5	
<b>Sistemas empíricos (Só um sistema: Q, RMR ou SMR)</b>	<b>Q</b>	<b>40 - 1.000</b>	<b>10 - 40</b>	<b>4 - 10</b>	<b>1 - 4</b>	<b>0,001 - 1</b>	
0,33							
Peso		1	2	3	4	5	
<b>RMR</b>	<b>RMR</b>	<b>100 - 81</b>	<b>80 - 61</b>	<b>60 - 41</b>	<b>40 - 21</b>	<b>20 - 1</b>	
0,34							
Peso		1	2	3	4	5	
<b>SMR</b>	<b>SMR</b>	<b>100 - 81</b>	<b>80 - 61</b>	<b>60 - 41</b>	<b>40 - 21</b>	<b>20 - 1</b>	
0,33							
Peso		1	2	3	4	5	
<b>Sistema de drenagem</b> 0,11	<b>Drenagem superficial</b>	<b>Estado de conservação</b>	<b>Muito Bom</b>	<b>Bom</b>	<b>Médio</b>	<b>Mau</b>	<b>Muito Mau</b>
	0,60						
Peso		0,35	1	2	3	4	5

		<b>Estado de manutenção</b>	Bom	Médio	Mau	-	-
		0,45					
		Peso	1	2	3	-	-
		<b>Presença</b>	Sim	Não	-	-	-
		0,20					
		Peso	1 - 2	4 - 5	-	-	-
	<b>Drenagem subsuperficial</b>	<b>Presença</b>	Sim	Não	-	-	-
		1,0					
		0,20					
		Peso	1 - 2	4 - 5	-	-	-
	<b>Drenagem da berma</b>	<b>Presença</b>	Sim	Não	-	-	-
		1,0					
		0,20					
		Peso	1 - 2	4 - 5	-	-	-
<b>Inspeção visual</b>	<b>Estado de conservação</b>	<b>Classificação</b>	Muito Bom	Bom	Médio	Mau	Muito Mau
0,13	0,60	Peso	1	2	3	4	5
	<b>Estado de manutenção</b>	<b>Classificação</b>	Bom	Médio	Mau		
	0,40	Peso	1	2	3		
<b>Monitoração</b>	<b>Células de carga</b>	<b>Intervalos</b>	1	2	3	4	5
0,11	0,25		[0 - 20%]	[20 - 40%]	[40 - 60%]	[60 - 80%]	[80 - 100%]
		Peso	1	2	3	4	5
	<b>Inclinômetros</b>	<b>Intervalos</b>	1	2	3	4	5
	0,25		[0 - 20%]	[20 - 40%]	[40 - 60%]	[60 - 80%]	[80 - 100%]
		Peso	1	2	3	4	5
	<b>Piezômetros</b>	<b>Intervalos</b>	1	2	3	4	5
	0,25		[0 - 20%]	[20 - 40%]	[40 - 60%]	[60 - 80%]	[80 - 100%]
		Peso	1	2	3	4	5
	<b>Marcas topográficas</b>	<b>Intervalos</b>	1	2	3	4	5
	0,25		[0 - 20%]	[20 - 40%]	[40 - 60%]	[60 - 80%]	[80 - 100%]
		Peso	1	2	3	4	5
<b>Histórico</b>	<b>Acidentes no talude</b>	<b>Rockfall</b>	Nenhum	Inativo	Algum	Ativo	Muito Ativo
0,07	0,07	0,25					
		Peso	1	2	3	4	5
		<b>Planar</b>	Nenhum	Inativo	Algum	Ativo	Muito Ativo
		0,25					
		Peso	1	2	3	4	5
		<b>Cunha</b>	Nenhum	Inativo	Algum	Ativo	Muito Ativo
		0,25					
		Peso	1	2	3	4	5

		<b>Circular</b> 0,25 Peso	Nenhum 1	Inativo 2	Algum 3	Ativo 4	Muito Ativo 5
	<b>Intervenções</b> 0,30 Peso		Nível 3 1 - 2	Nível 2 3	Nível 3 4 - 5	- -	- -
<b>Ambiente/ tráfego</b> 0,08	<b>Zona sísmica</b> 0,30	<b>Tipo 2</b> 0,60 Peso	2,1 5	2,2 4	2,3 3	2,4 2	2,5 1
		<b>Tipo 1</b> 0,60 Peso	1,1 5	1,2 4	1,3 3	1,4 2	1,5 - 1,6 1
	<b>Precipitação anual (mm)</b> 0,50		< 100 1	100 - 500 2	500 - 1.000 3	1.000 - 2.000 4	> 2.000 5
<b>Tráfego</b> 0,20	<b>Velocidade máxima (km/h)</b> 0,50 Peso		50 - 60 1	60 - 70 2	70 - 90 3	90 - 100 4	100 - 120 5
		<b>Tráfego médio diário (veículos)</b> 0,50 Peso	< 18.000 1	1.800 - 1.900 2	1.900 - 2.000 3	2.000 - 2.200 4	> 2.200 5
	<b>Proteção</b> 0,10	<b>Proteção superficial</b> 0,80 Peso	< 25% 5	[25 - 50%] 4	50% 3	[50 - 75%] 2	[75 - 100%] 1
<b>Arredores</b> 0,90	<b>Cobertura vegetal</b> 0,20 Peso		Não existe 5	Pontual 4 - 3	Uniforme 1 - 2	- -	- -
		<b>Sobrecarga</b> 0,60 Peso	Sim 5	Não 1	- -	- -	- -
		<b>Vibrações</b> 0,40 Peso	Sim 5	Não 1	- -	- -	- -

**TABELA 2. DESCRIÇÃO DE FORMAÇÕES GEOLÓGICAS E INTERVENÇÕES**

Tipo	I	II	III	IV	V
Descrição das formações	Metamórficas: gnaiss, quartzito, anfíbolito e migmatito Ígneas: granito, granodiorito, diorito e gabro	Metamórficas: cornean Sedimentárias: conglomerado Ígneas: andesito, norite, obsidiana e dolerite	Sedimentárias: arenito Ígneas: basalto, tufa, brecha, dacite e rhyolite	Metamórficas: shale e mármore Sedimentárias: gesso e anidrido	Metamórficas: filito Sedimentárias: argilito
Nível	1		2		3
Grupo	Proteção superficial		Sistema de drenagem	Estabilidade dos blocos	Estruturas de suporte
Descrição das intervenções	Uso de materiais naturais e artificiais para melhorar a estabilidade do talude, como cobertura vegetal e construção de diques		Incluem todas as ações que podem ser feitas para drenagem (superficial e profunda)	Remoção dos blocos e uso de malhas	Muros de retenção que podem ser de concreto, alvenaria, solo reforçado, etc.

### ANEXO 3. ANÁLISE DE HSQI PARA AS ENCOSTAS DE CAMPO

nom.	Formação superficial	c (kPa)	$\phi$ (°)	$\sigma_c$ (kPa)	$\sigma\phi$ (°)
QdII	Fluxo de lamas e/ou detritos	19	23	11,5	8,2
TQsrs	Solos residuais derivados do <i>Stock</i> de San Diego	17	30	15,1	8,3
Tqsra	Solos residuais derivados de anfibólitos de Medellín	25	28	13,6	5,6
TQsrd	solos residuais derivados de dunitos de Medellín	34	25	10,2	2,5
TQsrm	Solos residuais de migmatitos de Puente Pelaez	25	38	7,5	3,8
QdII	Depósitos de deslizamento	14	21	10,5	3,5
Tomado do microzoneamento sísmico de Medellín					
$\sigma_c$ (kPa) Desvio padrão da coesão					
$\sigma\phi$ (°) Desvio padrão do ângulo de atrito					
Os espaços vazios são pontos sem dados.					

Localização	Enc.	Geologia	Tipo de solo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	Índice de qualidade HSQI			H (m)	i	Inest.	Tratamentos				
							x	y	HSQI				Muros de concreto ref.	Muros de pilhas	Ancoragem e concreto projetado	Drenagem subsup.	Drenagem superficial
km 0 + 100	1	<i>Stock</i> de San Diego	ML	18	17	30	21,3	36,8	<b>0,7</b>	35	52	x			x	x	
km 0 + 200	2	<i>Stock</i> de San Diego	ML	18	17	30	9,3	42,0	<b>0,9</b>	40	40	x	x				x
km 0 + 300	3	<i>Stock</i> de San Diego	ML	18	17	30	14,3	31,5	<b>0,9</b>	30	45	x					
km 0 + 400	4	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	26,1	37,6	<b>0,6</b>	40	50	x					x
km 0 + 500	5	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	16,1	37,6	<b>0,8</b>	40	40	x					
km 0 + 600	6	<i>Stock</i> de San Diego	ML	18	17	30	9,3	12,6	<b>1,4</b>	12	40						
km 0 + 700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 0 + 800	7	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	26,1	23,5	<b>0,7</b>	25	50	x			x	x	x
km 0 + 900	8	<i>Stock</i> de San Diego	ML	18	17	30	19,3	26,3	<b>0,8</b>	25	50	x			x	x	x
km 1 + 000	9	<i>Stock</i> de San Diego	ML	18	17	30	19,3	21,0	<b>0,9</b>	20	50	x			x	x	x
km 1 + 100	10	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	56,1	11,3	<b>0,6</b>	12	80	x					
km 1 + 200	11	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	6,1	23,5	<b>1,2</b>	25	30						

							Índice de qualidade HSQI			H (m)	i	Inest.	Tratamentos				
							Caso CB						Muros de concreto ref.	Muros de pilhas	Ancoragem e concreto projetado	Drenagem subsup.	Drenagem superficial
Localização	Enc.	Geologia	Tipo de solo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	x	y	HSQI								
km 1 + 300	12	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	46,1	11,3	<b>0,6</b>	12	70	x					
km 1 + 400	13	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	36,1	23,5	<b>0,6</b>	25	60	x	x	x		x	
km 1 + 500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 1 + 600	14	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	1,2	18,3	<b>1,5</b>	25	30						x
km 1 + 700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 1 + 800	15	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	21,1	47,0	<b>0,6</b>	50	45	x					x
km 1 + 900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 2 + 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 2 + 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 2 + 200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 2 + 300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 2 + 400	16	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	26,1	28,2	<b>0,7</b>	30	50	x					x
km 2 + 500	17	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	26,1	28,2	<b>0,7</b>	30	50	x					x
km 2 + 600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 2 + 700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 2 + 800	18	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	21,2	14,6	<b>1,0</b>	20	50	x					
km 2 + 900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 3 + 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 3 + 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
km 3 + 200	19	<i>Stock</i> de San Diego		18	17	30	29,3	4,2	<b>1,6</b>	4	60						
km 3 + 300	20	<i>Stock</i> de San Diego		18	17	30	19,3	5,3	<b>1,6</b>	5	50						
km 3 + 400	21	Fluxos de lamas e/ou detritos		18	19	23	26,1	5,6	<b>1,4</b>	6	50						
km 3 + 500	22	Fluxos de lamas e/ou detritos		18	19	23	46,1	3,8	<b>1,4</b>	4	70						
km 3 + 600	23	Fluxos de lamas e/ou detritos		18	19	23	46,1	3,8	<b>1,4</b>	4	70						
km 3 + 700	24	Fluxos de lamas e/ou detritos		18	19	23	36,1	4,7	<b>1,4</b>	5	60						
km 3 + 800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						

							Índice de qualidade HSQI			H (m)	i	Inest.	Tratamentos				
							Caso CB						Muros de concreto ref.	Muros de pilhas	Ancoragem e concreto projetado	Drenagem subsup.	Drenagem superficial
Localização	Enc.	Geologia	Tipo de solo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	x	y	HSQI								
km 3 + 900	25	Stock de San Diego	ML	18	17	30	19,3	10,5	1,2	10	50						
km 4 + 000	26	Stock de San Diego	ML	18	17	30	29,3	4,2	1,6	4	60						
km 4 + 100	27	Stock de San Diego	ML	18	17	30	29,3	5,3	1,4	5	60						
km 4 + 200	28	Stock de San Diego	ML	18	17	30	29,3	5,3	1,4	5	60						
km 4 + 300	29	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	21,2	11,0	1,2	15	50						
km 4 + 400	30	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	11,2	8,8	1,5	12	40						
km 4 + 500	31	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	11,2	7,3	1,6	10	40						
km 4 + 600	32	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	41,2	11,0	0,8	15	70	x					
km 4 + 700	33	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	51,2	7,3	0,9	10	80	x					
km 4 + 800	34	Stock de San Diego	ML	18	17	30	39,3	15,8	0,7	15	70	x					
km 4 + 900	35	Stock de San Diego	ML	18	17	30	59,3	8,4	0,5	8	90	x		x			
km 5 + 000	36	Stock de San Diego	ML	18	17	30	9,3	42,0	0,9	40	40						
km 5 + 100	37	Stock de San Diego	ML	18	17	30	14,3	21,0	1,0	20	45						
km 5 + 200	38	Stock de San Diego	ML	18	17	30	14,3	14,7	1,2	14	45						
km 5 + 300	39	Stock de San Diego	ML	18	17	30	19,3	10,5	1,2	10	50						
km 5 + 400	40	Stock de San Diego	ML	18	17	30	-0,7	21,0	1,5	20	30						
km 5 + 500	41	Stock de San Diego	ML	18	17	30	19,3	21,0	0,9	20	50	x					
km 5 + 600	42	Stock de San Diego	MH	18	17	30	29,3	15,8	0,9	15	60						
km 5 + 700	43	Fluxos de lamas e/ou detritos	ML	18	19	23	26,1	14,1	1,0	15	50						
km 5 + 800	44	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	26,1	14,1	1,0	15	50						
km 5 + 900	45	Fluxos de lamas e/ou detritos	ML	18	19	23	6,1	14,1	1,4	15	30						
km 6 + 000	46	Stock de San Diego	MH	18	17	30	9,3	12,6	1,4	12	40						
km 6 + 100	47	Stock de San Diego	ML	18	17	30	39,3	12,6	0,8	12	70	x					
km 6 + 200	48	Stock de San Diego	ML	18	17	30	29,3	15,8	0,8	15	60						
km 6 + 300	49	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	1,2	29,2	1,2	40	30						
km 6 + 400	50	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	11,2	36,5	0,9	50	40	x	x				

							Índice de qualidade HSQI			H (m)	i	Inest.	Tratamentos				
							Caso CB						Muros de concreto ref.	Muros de pilhas	Ancoragem e concreto projetado	Drenagem subsup.	Drenagem superficial
Localização	Enc.	Geologia	Tipo de solo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	x	y	HSQI								
km 6 + 500	51	Anfibolitos de Medellín	MH	18	25	28	6,2	43,8	<b>0,9</b>	60	35	x	x				
km 6 + 600	52	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	21,2	11,0	<b>1,2</b>	15	50						
km 6 + 700	53	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	31,2	14,6	<b>0,9</b>	20	60	x	x			x	x
km 6 + 800	54	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	51,2	7,3	<b>0,9</b>	10	80	x		x			
km 6 + 900	55	Depósitos de deslizamento	ML	18	14	21	38,6	25,7	<b>0,5</b>	20	60						
km 7 + 000	56	Depósitos de deslizamento	MH	18	14	21	28,6	25,7	<b>0,6</b>	20	50	x					
km 7 + 100	57	Dunitos de Medellín	MH	18	34	25	34,5	2,6	<b>2,0</b>	5	60						
km 7 + 200	58	Dunitos de Medellín	MH	18	34	25	34,5	5,3	<b>1,3</b>	10	60						
km 7 + 300	59	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	24,5	5,3	<b>1,5</b>	10	50						
km 7 + 400	60	Fluxos de lamas e/ou detritos	ML	18	19	23	11,1	14,1	<b>1,3</b>	15	35						
km 7 + 500	61	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	34,5	5,3	<b>1,4</b>	10	60						
km 7 + 600	62	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	19,5	7,9	<b>1,4</b>	15	45						
km 7 + 700	63	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	44,5	5,3	<b>1,2</b>	10	70						
km 7 + 800	64	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	4,5	18,5	<b>1,3</b>	35	30	x					
km 7 + 900	65	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	4,5	7,9	<b>1,9</b>	15	30						
km 8 + 000	66	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	24,5	10,6	<b>1,2</b>	20	50						
km 8 + 100	67	Dunitos de Medellín	MH	18	34	25	14,5	42,4	<b>0,8</b>	80	40	x			x	x	x
km 8 + 200	68	Dunitos de Medellín	MH	18	34	25	14,5	42,4	<b>0,8</b>	80	40	x			x	x	x
km 8 + 300	69	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	36,1	18,8	<b>0,7</b>	20	60	x					
km 8 + 400	70	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	4,5	13,2	<b>1,5</b>	25	30						
km 8 + 500	71	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	34,5	13,2	<b>0,8</b>	25	60	x				x	x
km 8 + 600	72	Fluxos de lamas e/ou detritos	ML	18	19	23	21,1	28,2	<b>0,8</b>	30	45	x					x
km 8 + 700	73	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	39,5	10,6	<b>0,9</b>	20	65	x					
km 8 + 800	74	Dunitos de Medellín	MH	18	34	25	39,5	10,6	<b>0,9</b>	20	65	x					
km 8 + 900	75	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	44,5	6,4	<b>1,0</b>	12	70	x					
km 9 + 000	76	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	44,5	6,4	<b>1,0</b>	12	70	x					

							Índice de qualidade HSQI			H (m)	i	Inest.	Tratamentos				
							Caso CB						Muros de concreto ref.	Muros de pilhas	Ancoragem e concreto projetado	Drenagem subsup.	Drenagem superficial
Localização	Enc.	Geologia	Tipo de solo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	x	y	HSQI								
km 9 + 100	77	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	34,5	5,3	1,3	10	60	x					
km 9 + 200	78	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	54,5	2,6	1,6	5	80						
km 9 + 300	79	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	34,5	7,9	1,0	15	60						
km 9 + 400	80	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	34,5	7,9	1,0	15	60						
km 9 + 500	81	Dunitos de Medellín	MH	18	34	25	44,5	6,4	1,0	12	70						
km 9 + 600	82	Fluxos de lamas e/ou detritos	ML	18	19	23	41,1	11,3	0,8	12	65	x					
km 9 + 700	83	Fluxos de lamas e/ou detritos	ML	18	19	23	41,1	14,1	0,7	15	65						
km 9 + 800	84	Fluxos de lamas e/ou detritos	ML	18	19	23	26,1	14,1	1,0	15	50						
km 9 + 900	85	Dunitos de Medellín	MH	18	34	25	9,5	13,2	1,4	25	35						x
km 10 + 000	86	Dunitos de Medellín	MH	18	34	25	34,5	10,6	0,9	20	60						x
km 10 + 100	87	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	14,5	37,1	0,8	70	40	x					x
km 10 + 200	88	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	24,5	10,6	1,2	20	50						
km 10 + 300	89	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	34,5	7,9	1,1	15	60	x			x	x	
km 10 + 400	90	Dunitos de Medellín	ML	18	34	25	14,5	31,8	0,9	60	40	x	x			CL na base	
km 10 + 500	91	Dunitos de Medellín	MH	18	34	25	24,5	10,6	1,2	20	50	x	x				
km 10 + 600	92	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	11,1	18,8	1,2	20	35						
km 10 + 700	93	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	11,1	23,5	1,0	25	35	x					
km 10 + 800	94	Fluxos de lamas e/ou detritos	ML	18	19	23	26,1	23,5	0,7	25	50						
km 10 + 900	95	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	26,1	28,2	0,7	30	50						
km 11 + 000	96	Fluxos de lamas e/ou detritos	MH	18	19	23	51,1	14,1	0,6	15	75						
km 11 + 100	97	Depósitos de deslizamento	ML	18	14	21	48,6	12,9	0,7	10	70						
km 11 + 200	98	Depósitos de deslizamento	MH	18	14	21	58,6	12,9	0,5	10	80	x					
km 11 + 300	99	Depósitos de deslizamento	ML	18	14	21	18,6	38,6	0,7	30	40	x					
km 11 + 400	100	Depósitos de deslizamento	MH	18	14	21	48,6	19,3	0,5	15	70				CL	x	
km 11 + 500	101	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	11,2	28,8	1,0	40	50	x	x	x		x	
km 11 + 600	102	Depósitos de deslizamento	MH	18	14	21	43,6	38,6	0,5	30	65	x	x	x		x	

							Índice de qualidade HSQI			H (m)	i	Inest.	Tratamentos				
							Caso CB						Muros de concreto ref.	Muros de pilhas	Ancoragem e concreto projetado	Drenagem subsup.	Drenagem superficial
Localização	Enc.	Geologia	Tipo de solo	$\gamma$ (kN/ m3)	c (kPa)	$\phi$ (°)	x	y	HSQI								
km 11 + 700	103	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	31,2	7,3	<b>1,2</b>	10	60						
km 11 + 800	104	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	49,2	11,0	<b>0,7</b>	15	78	x			CL	x	x
km 11 + 900	105	Anfibolitos de Medellín	ML	18	25	28	49,2	11,0	<b>0,7</b>	15	78						
km 12 + 000	106	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	39,2	10,8	<b>0,7</b>	15	78						
km 12 + 100	107	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	39,2	10,8	<b>0,7</b>	15	78						
km 12 + 200	108	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	11,2	5,0	<b>2,0</b>	7	50	x	x				
km 12 + 300	109	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	11,2	5,0	<b>2,0</b>	7	50						
km 12 + 400	110	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	1,2	21,6	<b>1,4</b>	30	40						
km 12 + 500	111	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	1,2	8,6	<b>2,0</b>	12	40					x	
km 12 + 600	112	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	31,2	72,0	<b>0,5</b>	100	70	x				x	
km 12 + 700	113	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	26,2	28,8	<b>0,7</b>	40	65					x	x
km 12 + 800	114	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	31,2	5,8	<b>1,3</b>	8	70	x					
km 12 + 900	115	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	21,2	21,6	<b>0,9</b>	30	60	x	x	x		x	
km 13 + 000	116	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	21,2	14,4	<b>1,0</b>	20	60		X				
km 13 + 100	117	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	11,2	5,0	<b>2,0</b>	7	50						
km 13 + 200	118	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	11,2	5,0	<b>2,0</b>	7	50						
km 13 + 300	119	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	21,2	64,8	<b>0,5</b>	90	60	x					x
km 13 + 400	120	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	21,2	28,8	<b>0,8</b>	40	60	x			CL		
km 13 + 500	121	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	31,2	72,0	<b>0,5</b>	100	70	x	x			CL	x
km 13 + 600	122	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	21,2	36,0	<b>0,7</b>	50	60	x					
km 13 + 700	123	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	31,2	28,8	<b>0,6</b>	40	70	x	x				
km 13 + 800	124	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	31,2	10,8	<b>1,0</b>	15	70						
km 13 + 900	125	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	1,2	21,6	<b>1,4</b>	30	40						
km 14 + 000	126	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	41,2	28,8	<b>0,5</b>	40	80	x					
km 14 + 100	127	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	31,2	43,2	<b>0,5</b>	60	70	x	x				
km 14 + 200	128	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	31,2	28,8	<b>0,6</b>	40	70						
km 14 + 300	129	Migmatitos de Puente Peláez	ML	18	25	38	21,2	14,4	<b>1,0</b>	20	60	x	x			x	

## ANEXO 4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DO HSQI

Localização	E	i (°)	H (m)	c (kPa)	φ (°)	Desvio Padrão		Caso 1					Caso 2					Caso 3					Caso 4					HSQI médio	σ HSQI	prob. HSQI menor 1
						σc	σφ (°)	c+σc (kPa)	φ+σφ (°)	x1	y1	HSQI 1	c+σc (kPa)	φ-σφ (°)	x2	y2	HSQI 2	c-σc (kPa)	φ+σφ (°)	x3	y3	HSQI 3	c-σc (kPa)	φ-σφ (°)	x4	y4	HSQI 4			
km 1 + 200	1	52	35	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	12,8	19,6	1,1	32,2	21,8	29,7	19,6	0,7	2,0	38,4	12,8	100,0	0,6	2,0	21,8	29,7	100,0	0,5	0,7	0,21	90%
km 1 + 300	2	40	40	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	0,8	22,3	1,4	32,2	21,8	17,7	22,3	0,9	2,0	38,4	0,8	100,0	0,9	2,0	21,8	17,7	100,0	0,5	0,9	0,31	62%
km 1 + 400	3	45	30	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	5,8	16,8	1,3	32,2	21,8	22,7	16,8	0,9	2,0	38,4	5,8	100,0	0,8	2,0	21,8	22,7	100,0	0,5	0,9	0,31	65%
km 1 + 500	4	50	40	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	21,0	0,9	34,2	15,1	34,6	21,0	0,6	4,0	31,7	17,6	100,0	0,5	4,0	15,1	34,6	100,0	0,5	0,6	0,18	98%
km 1 + 600	5	40	40	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	7,6	21,0	1,2	34,2	15,1	24,6	21,0	0,8	4,0	31,7	7,6	100,0	0,7	4,0	15,1	24,6	100,0	0,5	0,8	0,24	80%
km 1 + 700	6	40	12	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	0,8	6,7	2,0	32,2	21,8	17,7	6,7	1,5	2,0	38,4	0,8	100,0	0,9	2,0	21,8	17,7	100,0	0,5	1,3	0,58	33%
km 1 + 800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 1 + 900	7	50	25	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	13,1	1,2	34,2	15,1	34,6	13,1	0,8	4,0	31,7	17,6	100,0	0,5	4,0	15,1	34,6	100,0	0,5	0,7	0,28	82%
km 2 + 000	8	50	25	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	10,8	14,0	1,3	32,2	21,8	27,7	14,0	0,9	2,0	38,4	10,8	100,0	0,5	2,0	21,8	27,7	100,0	0,5	0,8	0,33	72%
km 2 + 100	9	50	20	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	10,8	11,2	1,4	32,2	21,8	27,7	11,2	1,0	2,0	38,4	10,8	100,0	0,5	2,0	21,8	27,7	100,0	0,5	0,9	0,38	65%
km 2 + 200	10	80	12	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	47,6	6,3	1,0	34,2	15,1	60,0	6,3	0,5	4,0	31,7	47,6	53,6	0,5	4,0	15,1	60,0	53,6	0,5	0,6	0,21	96%
km 2 + 300	11	30	25	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	-2,4	13,1	1,8	34,2	15,1	14,6	13,1	1,2	4,0	31,7	-2,4	100,0	0,9	4,0	15,1	14,6	100,0	0,6	1,2	0,46	37%
km 2 + 400	12	70	12	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	37,6	6,3	1,2	34,2	15,1	54,6	6,3	0,9	4,0	31,7	37,6	53,6	0,5	4,0	15,1	54,6	53,6	0,5	0,7	0,29	82%
km 2 + 500	13	60	25	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	27,6	13,1	1,0	34,2	15,1	44,6	13,1	0,7	4,0	31,7	27,6	100,0	0,5	4,0	15,1	44,6	100,0	0,5	0,7	0,19	97%
km 2 + 600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 2 + 700	14	30	25	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	-7,3	11,3	2,0	39,7	20,0	9,6	11,3	1,4	9,5	36,6	-7,3	47,2	1,3	9,5	20,0	9,6	47,2	0,8	1,4	0,42	16%
km 2 + 800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 2 + 900	15	45	50	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	12,6	26,3	1,0	34,2	15,1	29,6	26,3	0,6	4,0	31,7	12,6	100,0	0,6	4,0	15,1	29,6	100,0	0,5	0,7	0,17	98%
km 3 + 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 500	16	50	30	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	15,8	1,1	34,2	15,1	34,6	15,8	0,7	4,0	31,7	17,6	100,0	0,5	4,0	15,1	34,6	100,0	0,5	0,7	0,23	91%
km 3 + 600	17	50	30	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	15,8	1,1	34,2	15,1	34,6	15,8	0,7	4,0	31,7	17,6	100,0	0,5	4,0	15,1	34,6	100,0	0,5	0,7	0,23	91%
km 3 + 700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 2 + 800	18	50	20	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	12,7	9,1	1,5	39,7	20,0	29,6	9,1	1,1	9,5	36,6	12,7	37,7	0,8	9,5	20,0	29,6	37,7	0,5	1,0	0,35	52%
km 2 + 900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 200	19	60	4	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	20,8	2,2	2,0	32,2	21,8	37,7	2,2	1,9	2,0	38,4	20,8	35,6	0,7	2,0	21,8	37,7	35,6	0,5	1,3	0,70	32%
km 3 + 300	20	50	5	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	10,8	2,8	2,0	32,2	21,8	27,7	2,8	1,9	2,0	38,4	10,8	44,4	0,8	2,0	21,8	27,7	44,4	0,5	1,4	0,67	29%
km 3 + 400	21	50	6	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	3,2	2,0	34,2	15,1	34,6	3,2	1,7	4,0	31,7	17,6	26,8	0,9	4,0	15,1	34,6	26,8	0,6	1,3	0,59	31%
km 3 + 500	22	70	4	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	37,6	2,1	2,0	34,2	15,1	54,6	2,1	1,9	4,0	31,7	37,6	17,9	0,7	4,0	15,1	54,6	17,9	0,5	1,3	0,69	34%
km 3 + 600	23	70	4	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	37,6	2,1	2,0	34,2	15,1	54,6	2,1	1,9	4,0	31,7	37,6	17,9	0,7	4,0	15,1	54,6	17,9	0,5	1,3	0,70	34%
km 3 + 700	24	60	5	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	27,6	2,6	2,0	34,2	15,1	44,6	2,6	1,7	4,0	31,7	27,6	22,3	0,7	4,0	15,1	44,6	22,3	0,5	1,3	0,63	34%
km 3 + 800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
km 3 + 900	25	50	10	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	10,8	5,6	1,9	32,2	21,8	27,7	5,6	1,4	2,0	38,4	10,8	88,9	0,7	2,0	21,8	27,7	88,9	0,5	1,1	0,58	40%
km 4 + 000	26	60	4	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	20,8	2,2	2,0	32,2	21,8	37,7	2,2	1,9	2,0	38,4	20,8	35,6	0,7	2,0	21,8	37,7	35,6	0,5	1,3	0,70	32%
km 4 + 100	27	60	5	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	20,8	2,8	2,0	32,2	21,8	37,7	2,8	1,8	2,0	38,4	20,8	44,4	0,6	2,0	21,8	37,7	44,4	0,5	1,3	0,68	35%
km 4 + 200	28	60	5	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	20,8	2,8	2,0	32,2	21,8	37,7	2,8	1,8	2,0	38,4	20,8	44,4	0,6	2,0	21,8	37,7	44,4	0,5	1,3	0,68	35%
km 4 + 300	29	50	15	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	12,7	6,8	1,7	39,7	20,0	29,6	6,8	1,3	9,5	36,6	12,7	28,3	0,9	9,5	20,0	29,6	28,3	0,6	1,1	0,39	37%

Localização	E	i (°)	H (m)	c (kPa)	φ (°)	σc	σφ (°)	c+σc (kPa)	φ+σφ (°)	x1	y1	HSQ I 1	c+σc (kPa)	φ-σφ (°)	x2	y2	HSQI 2	c-σc (kPa)	φ+σφ (°)	x3	y3	HSQI 3	c-σc (kPa)	φ-σφ (°)	x4	y4	HSQI 4	HSQI médio	σ HSQI	prob. HSQI menor 1
km 4 + 400	30	40	12	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	2,7	5,4	2,0	39,7	20,0	19,6	5,4	1,6	9,5	36,6	2,7	22,6	1,3	9,5	20,0	19,6	22,6	0,9	1,5	0,42	14%
km 4 + 500	31	40	10	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	2,7	4,5	2,0	39,7	20,0	19,6	4,5	1,9	9,5	36,6	2,7	18,9	1,5	9,5	20,0	19,6	18,9	0,9	1,6	0,41	8%
km 4 + 600	32	70	15	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	32,7	6,8	1,2	39,7	20,0	49,6	6,8	0,9	9,5	36,6	32,7	28,3	0,6	9,5	20,0	49,6	28,3	0,5	0,8	0,29	75%
km 4 + 700	33	80	10	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	42,7	4,5	1,4	39,7	20,0	59,6	4,5	0,6	9,5	36,6	42,7	18,9	0,6	9,5	20,0	59,6	18,9	0,5	0,8	0,35	73%
km 4 + 800	34	70	15	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	30,8	8,4	1,1	32,2	21,8	47,7	8,4	0,9	2,0	38,4	30,8	100,0	0,5	2,0	21,8	47,7	100,0	0,5	0,7	0,26	85%
km 4 + 900	35	90	8	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	50,8	4,5	1,3	32,2	21,8	60,0	4,5	0,5	2,0	38,4	50,8	71,1	0,5	2,0	21,8	60,0	71,1	0,5	0,7	0,35	84%
km 5 + 000	36	40	40	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	0,8	22,3	1,4	32,2	21,8	17,7	22,3	0,9	2,0	38,4	0,8	100,0	0,9	2,0	21,8	17,7	100,0	0,5	0,9	0,31	62%
km 5 + 100	37	45	20	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	5,8	11,2	1,6	32,2	21,8	22,7	11,2	1,1	2,0	38,4	5,8	100,0	0,8	2,0	21,8	22,7	100,0	0,5	1,0	0,41	51%
km 5 + 200	38	45	14	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	5,8	7,8	1,8	32,2	21,8	22,7	7,8	1,3	2,0	38,4	5,8	100,0	0,8	2,0	21,8	22,7	100,0	0,5	1,1	0,51	40%
km 5 + 300	39	50	10	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	10,8	5,6	1,9	32,2	21,8	27,7	5,6	1,4	2,0	38,4	10,8	88,9	0,7	2,0	21,8	27,7	88,9	0,5	1,1	0,58	40%
km 5 + 400	40	30	20	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	-9,2	11,2	2,0	32,2	21,8	7,7	11,2	1,5	2,0	38,4	-9,2	100,0	1,1	2,0	21,8	7,7	100,0	0,7	1,4	0,48	22%
km 5 + 500	41	50	20	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	10,8	11,2	1,4	32,2	21,8	27,7	11,2	1,0	2,0	38,4	10,8	100,0	0,7	2,0	21,8	27,7	100,0	0,5	0,9	0,34	63%
km 5 + 600	42	60	15	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	20,8	8,4	1,3	32,2	21,8	37,7	8,4	1,0	2,0	38,4	20,8	100,0	0,5	2,0	21,8	37,7	100,0	0,5	0,8	0,35	68%
km 5 + 700	43	50	15	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	7,9	1,4	34,2	15,1	34,6	7,9	1,1	4,0	31,7	17,6	67,0	0,6	4,0	15,1	34,6	67,0	0,5	0,9	0,37	60%
km 5 + 800	44	50	15	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	7,9	1,4	34,2	15,1	34,6	7,9	1,1	4,0	31,7	17,6	67,0	0,6	4,0	15,1	34,6	67,0	0,5	0,9	0,37	59%
km 5 + 900	45	30	15	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	-2,4	7,9	2,0	34,2	15,1	14,6	7,9	1,5	4,0	31,7	-2,4	67,0	1,0	4,0	15,1	14,6	67,0	0,6	1,3	0,52	28%
km 6 + 000	46	40	12	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	0,8	6,7	2,0	32,2	21,8	17,7	6,7	1,5	2,0	38,4	0,8	100,0	0,9	2,0	21,8	17,7	100,0	0,5	1,3	0,58	33%
km 6 + 100	47	70	12	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	30,8	6,7	1,1	32,2	21,8	47,7	6,7	0,9	2,0	38,4	30,8	100,0	0,5	2,0	21,8	47,7	100,0	0,5	0,8	0,26	83%
km 6 + 200	48	60	15	17,1	30,1	15,1	8,3	32,2	38,4	20,8	8,4	1,3	32,2	21,8	37,7	8,4	1,0	2,0	38,4	20,8	100,0	0,5	2,0	21,8	37,7	100,0	0,5	0,8	0,34	70%
km 6 + 300	49	30	40	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	-7,3	18,1	1,9	39,7	20,0	9,6	18,1	1,2	9,5	36,6	-7,3	75,5	1,2	9,5	20,0	9,6	75,5	0,8	1,2	0,39	26%
km 6 + 400	50	40	50	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	2,7	22,6	1,3	39,7	20,0	19,6	22,6	0,9	9,5	36,6	2,7	94,3	0,8	9,5	20,0	19,6	94,3	0,5	0,9	0,28	67%
km 6 + 500	51	35	60	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	-2,3	27,2	1,4	39,7	20,0	14,6	27,2	0,9	9,5	36,6	-2,3	100,0	0,9	9,5	20,0	14,6	100,0	0,6	0,9	0,28	59%
km 6 + 600	52	50	15	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	12,7	6,8	1,7	39,7	20,0	29,6	6,8	1,3	9,5	36,6	12,7	28,3	0,9	9,5	20,0	29,6	28,3	0,6	1,1	0,40	37%
km 6 + 700	53	60	20	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	22,7	9,1	1,2	39,7	20,0	39,6	9,1	0,9	9,5	36,6	22,7	37,7	0,6	9,5	20,0	39,6	37,7	0,5	0,8	0,29	71%
km 6 + 800	54	80	10	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	42,7	4,5	1,4	39,7	20,0	59,6	4,5	0,5	9,5	36,6	42,7	18,9	0,6	9,5	20,0	59,6	18,9	0,5	0,8	0,36	74%
km 6 + 900	55	60	20	14,0	21,0	15,1	8,3	29,1	29,3	30,1	12,4	0,9	29,1	12,7	47,0	12,4	0,7	-1,1	29,3	30,1	100,0	0,5	-1,1	12,7	47,0	100,0	0,5	0,6	0,19	98%
km 7 + 000	56	50	20	14,0	21,0	15,1	8,3	29,1	29,3	20,1	12,4	1,1	29,1	12,7	37,0	12,4	0,8	-1,1	29,3	20,1	100,0	0,5	-1,1	12,7	37,0	100,0	0,5	0,7	0,27	85%
km 7 + 100	57	60	5	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	26,0	1,8	2,0	49,1	16,7	43,0	1,8	1,9	18,9	33,3	26,0	4,8	1,5	18,9	16,7	43,0	4,8	1,2	1,7	0,34	2%
km 7 + 200	58	60	10	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	26,0	3,7	1,8	49,1	16,7	43,0	3,7	1,5	18,9	33,3	26,0	9,5	1,2	18,9	16,7	43,0	9,5	0,9	1,3	0,33	17%
km 7 + 300	59	50	10	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	16,0	3,7	2,0	49,1	16,7	33,0	3,7	1,6	18,9	33,3	16,0	9,5	1,4	18,9	16,7	33,0	9,5	1,0	1,5	0,36	9%
km 7 + 400	60	35	15	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	2,6	7,9	2,0	34,2	15,1	19,6	7,9	1,4	4,0	31,7	2,6	67,0	0,9	4,0	15,1	19,6	67,0	0,5	1,2	0,55	35%
km 7 + 500	61	60	10	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	26,0	3,7	1,8	49,1	16,7	43,0	3,7	1,5	18,9	33,3	26,0	9,5	1,2	18,9	16,7	43,0	9,5	0,9	1,3	0,33	16%
km 7 + 600	62	45	15	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	11,0	5,5	1,9	49,1	16,7	28,0	5,5	1,4	18,9	33,3	11,0	14,3	1,3	18,9	16,7	28,0	14,3	0,9	1,4	0,37	15%
km 7 + 700	63	70	10	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	36,0	3,7	1,6	49,1	16,7	53,0	3,7	1,3	18,9	33,3	36,0	9,5	1,0	18,9	16,7	53,0	9,5	0,8	1,2	0,32	30%
km 7 + 800	64	30	35	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	-4,0	12,8	1,9	49,1	16,7	13,0	12,8	1,3	18,9	33,3	-4,0	33,3	1,3	18,9	16,7	13,0	33,3	0,9	1,3	0,38	18%
km 7 + 900	65	30	15	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	-4,0	5,5	2,0	49,1	16,7	13,0	5,5	1,9	18,9	33,3	-4,0	14,3	1,9	18,9	16,7	13,0	14,3	1,2	1,8	0,31	1%
km 8 + 000	66	50	20	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	16,0	7,3	1,5	49,1	16,7	33,0	7,3	1,1	18,9	33,3	16,0	19,0	1,0	18,9	16,7	33,0	19,0	0,7	1,1	0,29	37%
km 8 + 100	67	40	80	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	6,0	29,3	1,1	49,1	16,7	23,0	29,3	0,7	18,9	33,3	6,0	76,2	0,9	18,9	16,7	23,0	76,2	0,5	0,8	0,21	86%
km 8 + 200	68	40	80	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	6,0	29,3	1,1	49,1	16,7	23,0	29,3	0,7	18,9	33,3	6,0	76,2	0,9	18,9	16,7	23,0	76,2	0,5	0,8	0,21	86%
km 8 + 300	69	60	20	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	27,6	10,5	1,1	34,2	15,1	44,6	10,5	0,8	4,0	31,7	27,6	89,3	0,5	4,0	15,1	44,6	89,3	0,5	0,7	0,23	89%
km 8 + 400	70	30	25	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	-4,0	9,2	2,0	49,1	16,7	13,0	9,2	1,5	18,9	33,3	-4,0	23,8	1,5	18,9	16,7	13,0	23,8	1,0	1,5	0,36	9%
km 8 + 500	71	60	25	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	26,0	9,2	1,2	49,1	16,7	43,0	9,2	0,9	18,9	33,3	26,0	23,8	0,7	18,9	16,7	43,0	23,8	0,5	0,8	0,24	78%
km 8 + 600	72	45	30	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	12,6	15,8	1,2	34,2	15,1	29,6	15,8	0,8	4,0	31,7	12,6	100,0	0,6	4,0	15,1	29,6	100,0	0,5	0,8	0,26	80%
km 8 + 700	73	65	20	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	31,0	7,3	1,2	49,1	16,7	48,0	7,3	0,9	18,9	33,3	31,0	19,0	0,7	18,9	16,7	48,0	19,0	0,5	0,8	0,23	75%
km 8 + 800	74	65	20	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	31,0	7,3	1,2	49,1	16																

Localização	E	i (°)	H (m)	c (kPa)	φ (°)	σc	σφ (°)	c+σc (kPa)	φ+σφ (°)	x1	y1	HSQ I 1	c+σc (kPa)	φ-σφ (°)	x2	y2	HSQI 2	c-σc (kPa)	φ+σφ (°)	x3	y3	HSQI 3	c-σc (kPa)	φ-σφ (°)	x4	y4	HSQI 4	HSQI médio	σ HSQI	prob. HSQI menor 1
km 9 + 500	81	70	12	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	36,0	4,4	1,4	49,1	16,7	53,0	4,4	1,3	18,9	33,3	36,0	11,4	0,9	18,9	16,7	53,0	11,4	0,7	1,0	0,30	44%
km 9 + 600	82	65	12	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	32,6	6,3	1,3	34,2	15,1	49,6	6,3	1,0	4,0	31,7	32,6	53,6	0,5	4,0	15,1	49,6	53,6	0,5	0,8	0,32	73%
km 9 + 700	83	65	15	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	32,6	7,9	1,1	34,2	15,1	49,6	7,9	0,9	4,0	31,7	32,6	67,0	0,5	4,0	15,1	49,6	67,0	0,5	0,7	0,25	85%
km 9 + 800	84	50	15	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	7,9	1,4	34,2	15,1	34,6	7,9	1,1	4,0	31,7	17,6	67,0	0,6	4,0	15,1	34,6	67,0	0,5	0,9	0,37	60%
km 9 + 900	85	35	25	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	1,0	9,2	2,0	49,1	16,7	18,0	9,2	1,3	18,9	33,3	1,0	23,8	1,3	18,9	16,7	18,0	23,8	0,9	1,4	0,38	16%
km 10 + 000	86	60	20	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	26,0	7,3	1,2	49,1	16,7	43,0	7,3	1,0	18,9	33,3	26,0	19,0	0,8	18,9	16,7	43,0	19,0	0,6	0,9	0,24	66%
km 10 + 100	87	40	70	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	6,0	25,7	1,1	49,1	16,7	23,0	25,7	0,8	18,9	33,3	6,0	66,7	0,8	18,9	16,7	23,0	66,7	0,5	0,8	0,22	81%
km 10 + 200	88	50	20	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	16,0	7,3	1,4	49,1	16,7	33,0	7,3	1,1	18,9	33,3	16,0	19,0	1,0	18,9	16,7	33,0	19,0	0,7	1,1	0,27	37%
km 10 + 300	89	60	15	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	26,0	5,5	1,5	49,1	16,7	43,0	5,5	1,2	18,9	33,3	26,0	14,3	0,9	18,9	16,7	43,0	14,3	0,7	1,1	0,29	41%
km 10 + 400	90	40	60	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	6,0	22,0	1,2	49,1	16,7	23,0	22,0	0,8	18,9	33,3	6,0	57,1	0,9	18,9	16,7	23,0	57,1	0,5	0,9	0,25	72%
km 10 + 500	91	50	20	34,0	25,0	15,1	8,3	49,1	33,3	16,0	7,3	1,5	49,1	16,7	33,0	7,3	1,1	18,9	33,3	16,0	19,0	1,0	18,9	16,7	33,0	19,0	0,7	1,1	0,28	37%
km 10 + 600	92	35	20	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	2,6	10,5	1,7	34,2	15,1	19,6	10,5	1,2	4,0	31,7	2,6	89,3	0,8	4,0	15,1	19,6	89,3	0,5	1,1	0,47	41%
km 10 + 700	93	35	25	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	2,6	13,1	1,6	34,2	15,1	19,6	13,1	1,1	4,0	31,7	2,6	100,0	0,8	4,0	15,1	19,6	100,0	0,5	1,0	0,40	49%
km 10 + 800	94	50	25	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	13,1	1,2	34,2	15,1	34,6	13,1	0,8	4,0	31,7	17,6	100,0	0,5	4,0	15,1	34,6	100,0	0,5	0,7	0,28	82%
km 10 + 900	95	50	30	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	17,6	15,8	1,1	34,2	15,1	34,6	15,8	0,7	4,0	31,7	17,6	100,0	0,5	4,0	15,1	34,6	100,0	0,5	0,7	0,23	91%
km 11 + 000	96	75	15	19,1	23,4	15,1	8,3	34,2	31,7	42,6	7,9	1,0	34,2	15,1	59,6	7,9	0,5	4,0	31,7	42,6	67,0	0,5	4,0	15,1	59,6	67,0	0,5	0,6	0,19	98%
km 11 + 100	97	70	10	14,0	21,0	15,1	8,3	29,1	29,3	40,1	6,2	1,1	29,1	12,7	57,0	6,2	0,9	-1,1	29,3	40,1	100,0	0,5	-1,1	12,7	57,0	100,0	0,5	0,7	0,27	83%
km 11 + 200	98	80	10	14,0	21,0	15,1	8,3	29,1	29,3	50,1	6,2	1,0	29,1	12,7	60,0	6,2	0,5	-1,1	29,3	50,1	100,0	0,5	-1,1	12,7	60,0	100,0	0,5	0,6	0,21	97%
km 11 + 300	99	40	30	14,0	21,0	15,1	8,3	29,1	29,3	10,1	18,6	1,2	29,1	12,7	27,0	18,6	0,8	-1,1	29,3	10,1	100,0	0,7	-1,1	12,7	27,0	100,0	0,5	0,8	0,25	83%
km 11 + 400	100	70	15	14,0	21,0	15,1	8,3	29,1	29,3	40,1	9,3	0,9	29,1	12,7	57,0	9,3	0,7	-1,1	29,3	40,1	100,0	0,5	-1,1	12,7	57,0	100,0	0,5	0,6	0,19	97%
km 11 + 500	101	50	40	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	2,8	18,0	1,4	40,1	29,7	19,7	18,0	1,0	9,9	46,3	2,8	72,7	0,9	9,9	29,7	19,7	72,7	0,5	1,0	0,32	56%
km 11 + 600	102	65	30	14,0	21,0	15,1	8,3	29,1	29,3	35,1	18,6	0,7	29,1	12,7	52,0	18,6	0,5	-1,1	29,3	35,1	100,0	0,5	-1,1	12,7	52,0	100,0	0,5	0,5	0,08	100%
km 11 + 700	103	60	10	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	22,7	4,5	1,7	39,7	20,0	39,6	4,5	1,4	9,5	36,6	22,7	18,9	0,9	9,5	20,0	39,6	18,9	0,6	1,2	0,43	36%
km 11 + 800	104	78	15	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	40,7	6,8	1,1	39,7	20,0	57,6	6,8	0,8	9,5	36,6	40,7	28,3	0,5	9,5	20,0	57,6	28,3	0,5	0,7	0,24	88%
km 11 + 900	105	78	15	24,6	28,3	15,1	8,3	39,7	36,6	40,7	6,8	1,1	39,7	20,0	57,6	6,8	0,8	9,5	36,6	40,7	28,3	0,5	9,5	20,0	57,6	28,3	0,5	0,7	0,24	88%
km 12 + 000	106	78	15	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	30,8	6,7	1,3	40,1	29,7	47,7	6,7	1,0	9,9	46,3	30,8	27,3	0,6	9,9	29,7	47,7	27,3	0,5	0,8	0,31	74%
km 12 + 100	107	78	15	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	30,8	6,7	1,3	40,1	29,7	47,7	6,7	1,0	9,9	46,3	30,8	27,3	0,6	9,9	29,7	47,7	27,3	0,5	0,8	0,31	74%
km 12 + 200	108	50	7	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	2,8	3,1	2,0	40,1	29,7	19,7	3,1	2,0	9,9	46,3	2,8	12,7	1,6	9,9	29,7	19,7	12,7	1,1	1,7	0,38	2%
km 12 + 300	109	50	7	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	2,8	3,1	2,0	40,1	29,7	19,7	3,1	2,0	9,9	46,3	2,8	12,7	1,6	9,9	29,7	19,7	12,7	1,1	1,7	0,38	2%
km 12 + 400	110	40	30	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	-7,2	13,5	2,0	40,1	29,7	9,7	13,5	1,4	9,9	46,3	-7,2	54,5	1,3	9,9	29,7	9,7	54,5	0,8	1,4	0,43	20%
km 12 + 500	111	40	12	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	-7,2	5,4	2,0	40,1	29,7	9,7	5,4	2,0	9,9	46,3	-7,2	21,8	1,7	9,9	29,7	9,7	21,8	1,1	1,8	0,39	2%
km 12 + 600	112	70	100	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	22,8	44,9	0,6	40,1	29,7	39,7	44,9	0,5	9,9	46,3	22,8	100,0	0,5	9,9	29,7	39,7	100,0	0,5	0,5	0,03	100%
km 12 + 700	113	65	40	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	17,8	18,0	1,0	40,1	29,7	34,7	18,0	0,7	9,9	46,3	17,8	72,7	0,5	9,9	29,7	34,7	72,7	0,5	0,7	0,19	95%
km 12 + 800	114	70	8	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	22,8	3,6	1,8	40,1	29,7	39,7	3,6	1,6	9,9	46,3	22,8	14,5	1,0	9,9	29,7	39,7	14,5	0,7	1,3	0,44	27%
km 12 + 900	115	60	30	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	12,8	13,5	1,3	40,1	29,7	29,7	13,5	0,9	9,9	46,3	12,8	54,5	0,7	9,9	29,7	29,7	54,5	0,5	0,9	0,28	69%
km 13 + 000	116	60	20	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	12,8	9,0	1,5	40,1	29,7	29,7	9,0	1,1	9,9	46,3	12,8	36,4	0,9	9,9	29,7	29,7	36,4	0,5	1,0	0,34	51%
km 13 + 100	117	50	7	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	2,8	3,1	2,0	40,1	29,7	19,7	3,1	2,0	9,9	46,3	2,8	12,7	1,6	9,9	29,7	19,7	12,7	1,1	1,7	0,38	2%
km 13 + 200	118	50	7	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	2,8	3,1	2,0	40,1	29,7	19,7	3,1	2,0	9,9	46,3	2,8	12,7	1,6	9,9	29,7	19,7	12,7	1,1	1,7	0,38	2%
km 13 + 300	119	60	90	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	12,8	40,4	0,6	40,1	29,7	29,7	40,4	0,5	9,9	46,3	12,8	100,0	0,5	9,9	29,7	29,7	100,0	0,5	0,5	0,05	100%
km 13 + 400	120	60	40	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	12,8	18,0	1,1	40,1	29,7	29,7	18,0	0,8	9,9	46,3	12,8	72,7	0,7	9,9	29,7	29,7	72,7	0,5	0,8	0,23	85%
km 13 + 500	121	70	100	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	22,8	44,9	0,6	40,1	29,7	39,7	44,9	0,5	9,9	46,3	22,8	100,0	0,5	9,9	29,7	39,7	100,0	0,5	0,5	0,03	100%
km 13 + 600	122	60	50	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	12,8	22,4	10,1	40,1	29,7	29,7	22,4	0,7	9,9	46,3	12,8	90,9	0,6	9,9	29,7	29,7	90,9	0,5	2,5	4,24	36%
km 13 + 700	123	70	40	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	22,8	18,0	0,9	40,1	29,7	39,7	18,0	0,6	9,9	46,3	22,8	72,7	0,5	9,9	29,7	39,7	72,7	0,5	0,6	0,16	99%
km 13 + 800	124	70	15	25,0	38,0	15,1	8,3	40,1	46,3	22,8	6,7	1,4	40,1	29,7	39,7	6,7	1,1	9,9	46,3	22,8	27,3	0,7	9,9	29,7	39,7	27,3	0,5	0,9	0,34	57%
km 13 + 900	125	40	30	25,0																										

## ANEXO 5. REGISTRO FOTOGRÁFICO



Figura A5.1. Las Palmas, km 0+100



Figura A5.2. Las Palmas, km 0+300



Figura A5.3. Las Palmas, km 0+400



Figura A5.4. Las Palmas, km 0+600



Figura A5.5. Las Palmas, km 0+800



Figura A5.6. Las Palmas, km 1+000



Figura A5.7. Las Palmas, km 1+100



Figura A5.10. Las Palmas, km 4+700



Figura A5.8. Las Palmas, km 1+200



Figura A5.11. Las Palmas, km 4+900



Figura A5.9. Las Palmas, km 1+400



Figura A5.12. Las Palmas, km 5+300



Figura A5.13. Las Palmas, km 6+200



Figura A5.16. Las Palmas, km 6+700



Figura A5.14. Las Palmas, km 6+500



Figura A5.17. Las Palmas, km 7+800

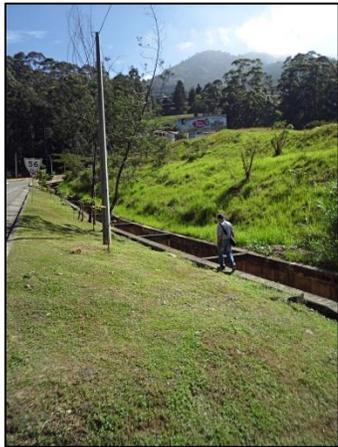


Figura A5.15. Las Palmas, km 6+600



Figura A5.18. Las Palmas, km 8+100



Figura A5.19. Las Palmas, km 8+300



Figura A5.22. Las Palmas, km 9+600



Figura A5.20. Las Palmas, km 8+500



Figura A5.23. Las Palmas, km 10+300



Figura A5.21. Las Palmas, km 8+900



Figura A5.24. Las Palmas, km 10+500



Figura A5.25. Las Palmas, km 11+200



Figura A5.28. Las Palmas, km 12+200



Figura A5.26. Las Palmas, km 11+500



Figura A5.29. Las Palmas, km 12+600



Figura A5.27. Las Palmas, km 11+800



Figura A5.30. Las Palmas, km 12+900



Figura A5.31. Las Palmas, km 13+200



Figura A5.32. Las Palmas, km 13+500



Figura A5.33. Las Palmas, km 13+900

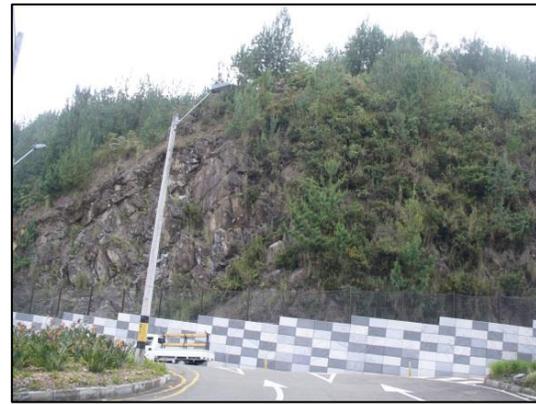


Figura A5.34. Las Palmas, km 14+100



Figura A5.35. Las Palmas, km 14+300

## **ANEXO 6. ZONEAMENTO HSQI DA RODOVIA LAS PALMAS**