

# **ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS INTERVENIENTES NO FENÓMENO DE HIDROPLANAGEM EM ZONAS DE INVERSÃO DE SOBREELEVAÇÃO**

**SÍLVIA MARLENE DIAS CARVALHO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO**

Orientador: Professor Doutor Adalberto Quelhas da Silva França

JUNHO DE 2012

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

*Se está a atravessar o Inferno, continue.*

*Winston Churchill*



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todos os que apoiaram a realização deste trabalho, em especial:

Ao meu orientador, Prof. Doutor Adalberto França pelo tempo disponibilizado, pelo material de pesquisa indicado e pelas orientações e conselhos dados ao longo deste trabalho.

Aos meus pais e madrinha, pela educação moral e religiosa que me deram e que ainda me dão, por me terem aplaudido no sucesso e repreendido nas idiotices, por me incentivarem a progredir e por financiarem os meus estudos.

Aos meus amigos, porque me proporcionam bons momentos de diversão e descontração, e porque longe ou perto, eu sei que, quando eu precisar eles virão.

Ao meu namorado, por gostar tanto de mim e me fazer sentir que é possível e que sou capaz, por me fazer sentir tão bem, mesmo quando tudo parece correr tão mal, por me compreender e me aceitar e por me tornar numa pessoa cada vez melhor.



## **RESUMO**

Os acidentes rodoviários são por vezes causados pela perda de controlo do veículo, que pode estar associada à existência de água no pavimento, possibilitando a ocorrência do fenómeno da hidroplanagem.

Este fenómeno tem sido alvo de estudo por vários autores nos últimos anos, que defendem que a ocorrência de hidroplanagem depende de vários fatores. Estes podem ser de origem meteorológica, do projeto e construção das estradas e do comportamento dos condutores.

Alguns desses autores desenvolveram expressões que permitem chegar à velocidade a partir da qual a hidroplanagem ocorre, como por exemplo França e Gallaway.

As expressões são diferentes e atribuem importâncias diferentes aos mesmos parâmetros.

Durante este trabalho estudam-se e comparam-se as duas expressões, com o objetivo de entender quais os parâmetros que mais influenciam a ocorrência deste fenómeno.

**PALAVRAS-CHAVE:** hidroplanagem, sobrelevação, rugosidade, precipitação, linhas de escoamento.



## **ABSTRACT**

Road accidents are sometimes caused by loss of control over the vehicle, which can be associated to the presence of water in the pavement, allowing the occurrence of hydroplaning.

This phenomenon has been studied by several authors in recent years, who argue that the occurrence of hydroplaning is dependent on many factors. These factors can have meteorological origin, or can be connected with the design, road construction and drivers' behaviour.

Some of these authors developed expressions for determining the speed at which hydroplaning occurs, such as França and Gallaway.

The expressions are different and give different importance to the same parameters.

During this work two expressions are studied and compared in order to understand which parameters influence the most the occurrence of this phenomenon.

**KEYWORDS:** hydroplaning, superelevation, roughness, precipitation, flow lines.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	1
<b>2 A HIDROPLANAGEM</b> .....	3
2.1. O QUE É A HIDROPLANAGEM .....	3
2.1.1. DEFINIÇÃO .....	3
2.1.2. HIDROPLANAGEM VISCOSA .....	3
2.1.3. HIDROPLANAGEM DINÂMICA.....	3
2.1.4. HIDROPLANAGEM POR SELAGEM DO PNEU .....	4
2.1.5. HIDROPLANAGEM COMBINADA.....	4
<b>2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A HIDROPLANAGEM</b> .....	5
2.2.1. GENERALIDADES .....	5
2.2.2. RUGOSIDADE DO PAVIMENTO.....	5
2.2.2.1. Microtextura .....	5
2.2.2.2. Macrotextura .....	5
2.2.3. INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO .....	6
2.2.4. LINHAS DE CORRENTE.....	7
2.2.5. ESPESSURA DA LÂMINA DE ÁGUA .....	7
2.2.6. VELOCIDADE .....	9
2.2.7. PNEUS.....	10
2.2.8. ÓRGÃOS DE DRENAGEM.....	11
2.2.9. MODELOS DE DISFARCE DE SOBREELEVAÇÃO.....	11
2.2.9.1. Modelo de Disfarce Linear .....	11
2.2.9.2. Modelo de Disfarce Parabólico de 3º Grau (Tipo I).....	12
2.2.9.3. Modelo de Disfarce Parabólico de 3º Grau (Tipo II).....	13

<b>3 A INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DOS PAVIMENTOS</b> .....	15
3.1. INTRODUÇÃO .....	15
3.2. FATORES AFETOS À RUGOSIDADE E AS SUAS RELAÇÕES .....	15
3.3. EXPRESSÕES A COMPARAR .....	17
<b>4 A INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO</b> .....	21
4.1. INTRODUÇÃO .....	21
4.2. EXPRESSÕES A COMPARAR .....	21
<b>5 A INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO TRAÇADO</b> .....	25
5.1. INTRODUÇÃO .....	25
5.2. EXTENSÃO DAS LINHAS DE ESCOAMENTO.....	25
5.3. INCLINAÇÃO .....	26
5.3.1. PREÂMBULO.....	26
5.3.2. INCLINAÇÃO TRANSVERSAL COM VARIAÇÃO LINEAR DE SE .....	26
5.3.3. INCLINAÇÃO TRANSVERSAL COM VARIAÇÃO PARABÓLICA DE 3º GRAU PARA SE.....	29
<b>6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CONCLUSÕES</b> .....	35
<b>7 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	41
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Fases da hidroplanagem. [Extraído e adaptado de Balkwill, 2003] .....	4
Fig. 2.2 – Definição de Macro e Microtextura. [Extraído e adaptado de Salpico, 2009] .....	5
Fig. 2.3 – Ensaio da Mancha de Areia. [Extraído e adaptado de Branco <i>et al.</i> , 2006] .....	6
Fig. 2.4 – Linhas de escoamento na zona de inversão da sobrelevação. [Extraído e adaptado de França, A. e Vasconcelos, A., 1991] .....	7
Fig. 2.5 – Definição de $h$ e $\epsilon_1$ . [Extraído e adaptado de Anderson <i>et al.</i> , 1998] .....	8
Fig. 2.6 – Pneu diagonal e pneu radial (estrutura e impressão) .....	11
Fig. 2.7 – Perfis transversais característicos de uma estrada de duas vias .....	12
Fig. 2.8 – Modelo de disfarce de sobrelevação linear. ....	12
Fig. 2.9 – Rotação em torno dos bordos interiores em estradas de vias múltiplas .....	13
Fig. 2.10 – Modelo de disfarce de sobrelevação parabólico de 3º grau (tipo I). ....	13
Fig. 2.11 – Modelo de disfarce de sobrelevação parabólico de 3º grau (tipo II). ....	14
Fig. 5.1 – Perfil longitudinal do B.I. e B.E. com modelo de disfarce linear .....	26
Fig. 5.2 – Planta da zona vizinha ao ponto de osculação entre o alinhamento reto e a clotóide .....	27
Fig. 5.3 – Perfil longitudinal do B.I. e B.E. com modelo parabólico de disfarce. ....	29



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Valores de H/S testados. ....	16
Quadro 3.2 – Valores de $\varepsilon_1$ . ....	16
Quadro 3.3 – Valores de K. ....	17
Quadro 3.4 – Aplicação Concreta da Expressão (3.1). ....	17
Quadro 3.5 – Aplicação Concreta da equação (3.2). ....	18
Quadro 3.6 – Comparação de h e V para diferentes rugosidades. ....	18
Quadro 4.1 – Influência da precipitação. Expressão (3.1). ....	22
Quadro 4.2 – Influência da precipitação. Expressão (3.2). ....	22
Quadro 4.3 – Comparação de h e V para diferentes intensidades de precipitação. ....	23
Quadro 5.1 – Inclinação média da linha de escoamento com $\delta=0.8\%$ . ....	32
Quadro 5.2 – Inclinação média da linha de escoamento com $\delta=1\%$ . ....	32
Quadro 5.3 – Comparação de h e V para diferentes conjuntos de l e p. ....	33
Quadro 6.1 – Influência da variação de cada parâmetro em h de Gallaway para o BB. ....	39
Quadro 6.2 – Influência da variação de cada parâmetro em h de Gallaway para o BBD. ....	39
Quadro 6.3 – Influência da variação de cada parâmetro em h de França para o BB. ....	39
Quadro 6.4 – Influência da variação de cada parâmetro em h de França para o BBD. ....	40



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 6.1 – Altura de água em função da altura do ensaio de areia para o BB. ....	35
Gráfico 6.2 – Altura de água em função da altura do ensaio de areia para o BBD.....	36
Gráfico 6.3 – Altura de água em função do coeficiente de escoamento para o BB.....	36
Gráfico 6.4 – Altura de água em função do coeficiente de escoamento para o BBD. ....	36
Gráfico 6.5 – Altura de água em função da intensidade de precipitação para o BB. ....	37
Gráfico 6.6 – Altura de água em função da intensidade de precipitação para o BBD. ....	37
Gráfico 6.7 – Altura de água em função do comprimento das linhas de escoamento para o BB.....	37
Gráfico 6.8 – Altura de água em função do comprimento das linhas de escoamento para o BBD. ....	38
Gráfico 6.9 – Altura de água em função da inclinação das linhas de escoamento para o BB.....	38
Gráfico 6.10 – Altura de água em função da inclinação das linhas de escoamento para o BBD. ....	38



## SÍMBOLOS

a – largura da faixa de rodagem

$\alpha$  – ângulo das asperezas do pavimento

d – inclinação do perfil longitudinal

$\delta$  – valor da inclinação longitudinal causada pelo disfarce de sobrelevação parabólico

$\epsilon$  – valor da inclinação longitudinal causada pelo disfarce de sobrelevação linear

$\epsilon_1$  – altura das asperezas do pavimento

h – altura da lâmina de água acima do topo das asperezas do pavimento

H/S – altura de areia do respetivo ensaio

i – inclinação do perfil transversal

ip – intensidade de precipitação

K – coeficiente de rugosidade

l – desenvolvimento da linha de escoamento mais desfavorável

L – extensão da clotóide

Ld – extensão do disfarce da sobrelevação em alinhamento reto

L' – soma entre L e Ld

p – inclinação média das linhas de escoamento

Se – valor da sobrelevação da curva circular

SI – valor da sobrelargura da curva circular

Sx – variação da sobrelevação ao longo da clotóide

V – velocidade de início do fenómeno de hidroplanagem



## **ABREVIATURAS**

ANSR – Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária

BB – betão betuminoso

BBD – betão betuminoso drenante

be – berma exterior

B.E. – bordo exterior

bi – berma interior

B.I. – bordo interior

IDF – Intensidade – Duração – Frequência

LCPC – Laboratoire central des ponts et chaussées (Laboratório Central de Estradas e Pontes)

OSEC – Observatório de Segurança das Estradas e Cidades

NASA – National Aeronautics And Space Administration (Agência Norte-Americana para os Assuntos de Aeronáutica e Espaço)

NCHRP – National Cooperative Highway Research Program (Cooperativa Nacional do Programa de Pesquisa Rodoviária)

RSB – revestimento superficial betuminoso



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO

Duas pessoas morreram por dia no ano 2011 nas estradas portuguesas em consequência de acidentes rodoviários, segundo dados da Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária.

Parte desses acidentes devem-se à condução irresponsável dos condutores. Outra parte deve-se com certeza às condições das nossas estradas que não correspondem às expectativas dos utilizadores.

Uma das causas dos acidentes é a perda de controlo do veículo, associada ao piso molhado e às velocidades elevadas características das autoestradas, configurando o fenómeno de aquaplanagem ou hidroplanagem.

A hidroplanagem ocorre quando existe uma lâmina de água entre os pneus e o pavimento, impedindo o contacto entre as duas superfícies e consequentemente impossibilitando a capacidade de condução.

O risco é maior nas zonas de disfarce de sobrelevação, nas zonas de curva em planta com fraca sobrelevação e fraca inclinação longitudinal, nas zonas caracterizadas por travagens frequentes e em zonas desabrigadas caracterizadas por ocorrência de ventos laterais intensos (Salpico, 2009).

Nas zonas de disfarce de sobrelevação existe um ponto crítico, o de inversão de sobrelevação, quando a inclinação transversal se anula. A baixa inclinação provoca o aumento da espessura da lâmina de água e é dever do projetista impedir que aumente demasiado, colocando os utilizadores em perigo.

## 1.2. OBJETIVOS

Pretende-se com esta investigação fazer uma análise de sensibilidade dos parâmetros que influenciam a ocorrência de hidroplanagem, focada nas zonas de inversão de sobrelevação.

Para isso, verificar-se-á a relevância comparativa de intensidade de precipitação, extensão e inclinação de linhas de corrente superficiais, micro e macro rugosidade do pavimento e modelo de disfarce de sobrelevação na potenciação do risco de hidroplanagem.

## 1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo este o primeiro, a Introdução, onde se apresenta o tema e se descrevem os objetivos.

O segundo capítulo, A Hidroplanagem, faz uma descrição simplificada do estado da arte deste tema e descreve os parâmetros que influenciam a hidroplanagem.

No terceiro capítulo, A Influência da Rugosidade dos Pavimentos, é isolado o parâmetro da rugosidade e estudado o impacto da sua variação no fenómeno da hidroplanagem.

O quarto capítulo, A Influência da Intensidade de Precipitação, e o quinto capítulo, A Influência da Geometria do Pavimento, seguem a mesma linha do terceiro, mas para os parâmetros aqui indicados.

No sexto capítulo é feita uma análise de sensibilidade das expressões à variação dos parâmetros e são ainda apresentadas as conclusões finais deste trabalho.

No sétimo e último capítulo são apresentadas as propostas de desenvolvimentos futuros na ótica do autor.

# 2

## A HIDROPLANAGEM

### 2.1. O QUE É A HIDROPLANAGEM

#### 2.1.1. DEFINIÇÃO

A hidroplanagem é a falta de contacto parcial ou total entre o pneu e o pavimento, devido a uma lâmina de água que se interpõe entre ambos.

Esta falta de contacto faz com que os pneus deixem de rodar sobre a superfície e passem a flutuar e escorregar, ou seja, o atrito fica reduzido ou mesmo nulo, levando a perda de controlo da direção e à dificuldade de travagem (Francisco, 2009).

São conhecidos quatro tipos de hidroplanagem no ambiente rodoviário: viscosa, dinâmica, por selagem do pneu e real/combinada.

#### 2.1.2. HIDROPLANAGEM VISCOSA

Este tipo de hidroplanagem pode ocorrer para velocidades relativamente baixas e requer apenas uma lâmina de água mesmo que muito fina e uma superfície muito lisa, condição esta que ocorre com mais frequência nas áreas impregnadas por borracha proveniente do desgaste dos pneus (Francisco, 2009).

O seu risco é aumentado pelos pneus com ranhuras muito gastas ou com o aumento da viscosidade da água por efeito de contaminação por exemplo com argilas, siltes, etc. (Salpico, 2009).

#### 2.1.3. HIDROPLANAGEM DINÂMICA

Esta hidroplanagem requer que a superfície do pavimento esteja coberta de água. Para o pneu estabelecer contacto com o pavimento, desloca a água para a frente e para os lados. Na frente de contacto, onde o pneu choca com a água, desenvolve-se uma pressão correspondente ao impulso da água que deforma o pneu e sustenta parcialmente a sua carga vertical. Isto acontece devido à rapidez do movimento, quando os pneus e a estrada não conseguem expulsar toda a água pisada pelos pneus.

Nesta fase pode ocorrer hidroplanagem parcial, que resulta da combinação entre a pouca aderência e a execução de uma travagem, ou surgimento da aceleração centrífuga ao percorrer uma curva, ou alteração de uma força lateral causada pelo vento.

Com o aumento da velocidade, a água que não é expulsa é cada vez maior até que, a partir de uma certa velocidade, deixa de existir qualquer contacto entre as duas superfícies. Chamamos a esta

velocidade a Velocidade Crítica de Hidroplanagem, e a este fenómeno a hidroplanagem total (Salpico, 2009).

#### 2.1.4. HIDROPLANAGEM POR SELAGEM DO PNEU

Ocorre na sequência de uma travagem brusca, com as rodas bloqueadas, sobre o pavimento molhado que, sendo muito liso, sem microtextura, permite que a borracha do pneu, aquecida e mole pela fricção, deslize sobre uma película de água sobre o pavimento (Salpico, 2009).

#### 2.1.5. HIDROPLANAGEM COMBINADA

Geralmente, a hidroplanagem que ocorre é uma combinação entre a hidroplanagem viscosa e a dinâmica. Estudos da NASA mostram três zonas distintas entre o pneu e o pavimento durante o fenómeno de hidroplanagem:

Zona 1 – existência de uma espessura considerável de água – hidroplanagem dinâmica.

Zona 2 – existência de uma fina película de água – hidroplanagem viscosa.

Zona 3 – a água é totalmente expulsa – zona teoricamente seca.

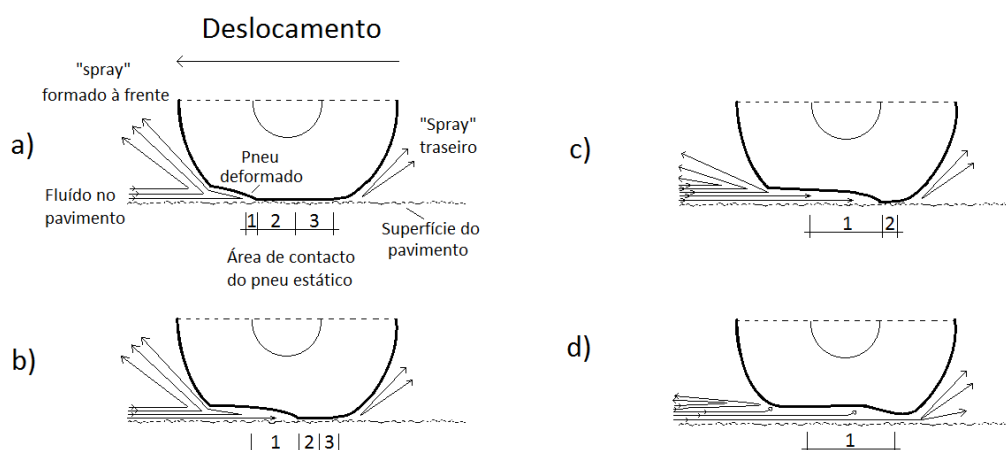


Fig. 2.1 – Fases da hidroplanagem. [Extraído e adaptado de Balkwill, 2003]

Na Fig. 2.1 estão representadas quatro fases na progressão de um pneu sobre o pavimento coberto por uma lâmina de água, onde a velocidade vai aumentando de a) até d).

Na fase a) a velocidade é reduzida, logo a zona 1 é muito pequena. Nesta fase desenvolvem-se pressões hidrodinâmicas que deformam e sustentam uma pequena parte da força vertical do pneu. As zonas 2 e 3 têm ainda uma dimensão considerável, o que garante aderência entre o pneu e o pavimento.

Na fase b) a velocidade é maior do que na fase a), logo a zona 1 aumentou, diminuindo as zonas 2 e 3. As pressões hidrodinâmicas são maiores, logo sustentam e deformam mais o pneu.

Na fase c) a velocidade é ainda maior que nas fases anteriores e já não existe a zona 3, ou seja, não há contacto seco entre o pneu e o pavimento. A aderência entre estas superfícies depende principalmente da microtextura do pavimento que pode ainda romper a fina película existente na zona 2.

Na fase d) a velocidade é já superior à crítica, não havendo qualquer contacto entre o pneu e o pavimento. É o caso de hidroplanagem dinâmica completa (Filho, 2006).

## 2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A HIDROPLANAGEM

### 2.2.1. GENERALIDADES

Há vários fatores que influenciam a ocorrência de hidroplanagem. A velocidade dos veículos, os pneus (pressão, largura, ranhuras), a espessura da lâmina de água, que depende da intensidade de precipitação, da largura da(s) via(s), das inclinações longitudinal e transversal, da rugosidade do pavimento e do uso de órgãos de drenagem.

### 2.2.2. RUGOSIDADE DO PAVIMENTO

A drenagem da água do pavimento depende das ranhuras do pneu e da textura da superfície do pavimento. Essa textura pode ser classificada em quatro tipos: microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade (Filho, 2006). A megatextura e a irregularidade são defeitos do pavimento e saem do contexto deste trabalho.

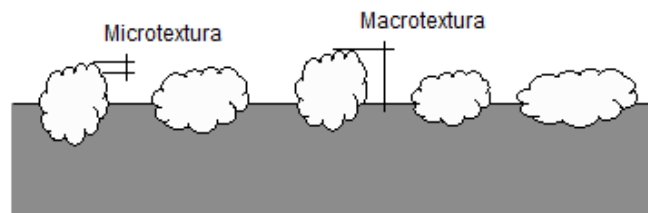


Fig. 2.2 – Definição de Macro e Microtextura. [Extraído e adaptado de Salpico, 2009]

#### 2.2.2.1. Microtextura

A microtextura é caracterizada pelo grau de rugosidade, ou aspereza individual da superfície das partículas do agregado que compõem a mistura do pavimento. A microtextura não é visível a olho nu, mas pode ser percebida por meio de tato, identificando-se superfícies lisas ou ásperas (Filho, 2006).

A microtextura é responsável por romper a película de água, quando esta é fina, assegurando alguns pontos de contacto entre o pneu e o pavimento.

#### 2.2.2.2. Macrotextura

A macrotextura é caracterizada pelo tamanho do agregado, pela faixa granulométrica (quantidades relativas das diversas dimensões de agregados), pela configuração geométrica individual do agregado e pelos vazios existentes na mistura. Um pavimento que tem como característica alta macrotextura possui, na sua mistura, agregado graúdo e anguloso, que frequentemente se evidencia acima da linha média da superfície, originando grande volume de vazios entre as partículas mais próximas (Filho, 2006).

A macrotextura assegura a drenagem da água do pavimento.

A avaliação da macrotextura do pavimento pode ser feita através do ensaio da mancha de areia ou com auxílio de um laser. O primeiro é o método mais clássico da estimação da altura média das asperezas.

O ensaio consiste no espalhamento de um determinado volume de areia sobre o pavimento, de modo a obter uma superfície aproximadamente circular, preenchendo todas as depressões da superfície do pavimento até que não seja possível aumentar a superfície de espalhamento.

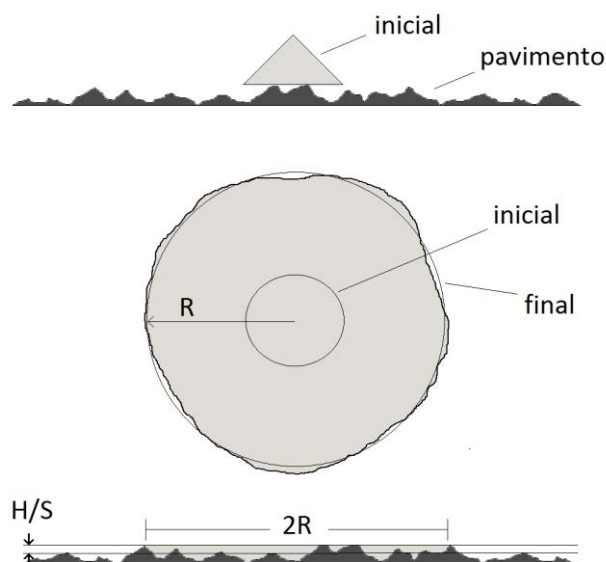


Fig. 2.3 – Ensaio da Mancha de Areia. [Extraído e adaptado de Branco *et al.*, 2006]

A altura do ensaio de areia é calculada através da equação:

$$H/S = \frac{\text{volume de areia}}{\pi \cdot R^2} \quad (2.1)$$

Este parâmetro está relacionado com a altura média das asperezas. Quanto maior H/S, maior é a altura média das asperezas, conseqüentemente menor é a altura de água no pavimento e maior é a velocidade que podemos praticar sem que ocorra hidroplanagem.

### 2.2.3. INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO

Este é um dos parâmetros ambientais que mais influencia a velocidade crítica de hidroplanagem. Quanto mais intensa e mais duradoura é uma chuvada, maior é a altura de água no pavimento, e se esta ultrapassar as asperezas do pavimento, menor é a velocidade crítica de hidroplanagem.

É um parâmetro aleatório e portanto, difícil de determinar. No entanto existem dois métodos diferentes para se selecionar a intensidade mais adequada a considerar.

O primeiro procura uma chuvada característica da zona em estudo, com um determinado período de retorno, através das curvas IDF (intensidade – duração – frequência).

O segundo relaciona a intensidade da precipitação com a máxima distância de visibilidade do condutor durante uma chuvada. Neste caso, a fraca visibilidade condiciona a velocidade do condutor, ou seja,

faz com que ele circule a uma velocidade mais baixa. Logo, a velocidade crítica de hidroplanagem não precisa ser muito maior que essa velocidade. Dito de outro modo, para determinadas condições do pavimento, podemos considerar uma intensidade de precipitação tal que, a velocidade crítica de hidroplanagem seja apenas um pouco superior à velocidade que o condutor irá praticar, condicionado pela fraca visibilidade que essa chuvada provocará.

#### 2.2.4. LINHAS DE CORRENTE

O fluxo de água no pavimento é caracterizado pelas várias linhas de corrente que o compõem e que são consequência do traçado da estrada. A água flui segundo a maior inclinação que encontra até sair do pavimento. Essa inclinação é a soma vetorial entre a inclinação longitudinal e a transversal.

Quanto maior o comprimento destas linhas e quanto menor a sua inclinação, maior será a altura de água no pavimento, situação que agrava a possibilidade de hidroplanagem. O comprimento destas linhas depende então das inclinações longitudinal e transversal da estrada em cada ponto, e da largura das vias que atravessa até sair da faixa de rodagem.

Se considerarmos um tranel descendente de forte inclinação longitudinal, temos um grande comprimento da linha de corrente, mas a situação é desagravada pelo facto dessa linha ter grande inclinação. A situação é complicada quando temos baixas inclinações associadas a grandes comprimentos, que é o caso da anulação da inclinação transversal por consequência da inversão da sobrelevação. Acontece que baixas inclinações não são compatíveis com grandes extensões. Em todo o caso, médias extensões com baixas inclinações e grandes extensões ainda que com razoáveis inclinações são sempre situações perigosas.

Neste local, a água precipitada junto a um dos bordos, vai fluir em direção ao outro bordo até à linha de inclinação nula, aqui inverte a direção do seu percurso e flui novamente em direção ao bordo por onde entrou. Isto faz com que a linha de corrente tenha um grande comprimento e uma baixa inclinação média.

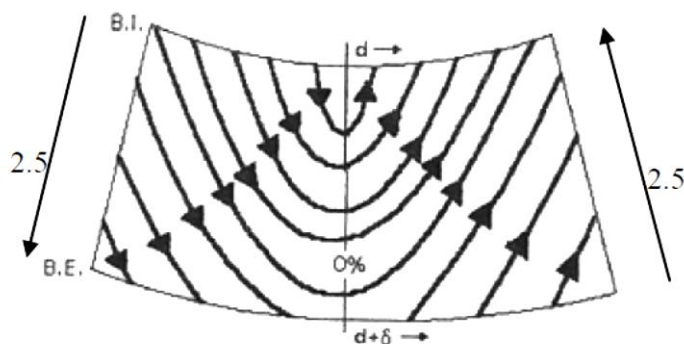


Fig. 2.4 – Linhas de escoamento na zona de inversão da sobrelevação. [Extraído e adaptado de França e Vasconcelos, 1991]

#### 2.2.5. ESPESSURA DA LÂMINA DE ÁGUA

A espessura da lâmina de água acima do topo das asperezas do pavimento é um fator que influencia a velocidade crítica de hidroplanagem. Quanto maior a referida espessura, maiores são as forças hidrodinâmicas e maior é a dificuldade da água ser expulsa pelo pneu e pela macrotextura do pavimento, logo menor é a velocidade crítica de hidroplanagem.

A espessura da lâmina de água acima das asperezas do pavimento ( $h$ ) é definida na Fig. 2.5 como sendo a diferença entre a espessura total de água na superfície do pavimento e a altura média das asperezas  $\varepsilon_1$ . A espessura total de água na superfície não engloba a água abaixo da altura média das asperezas pois está “aprisionada” nas mesmas e logo não contribui para o fluxo nem para a hidroplanagem (Anderson *et al.*, 1998).

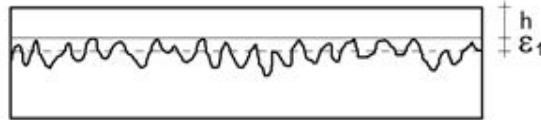


Fig. 2.5 – Definição de  $h$  e  $\varepsilon_1$ . [Extraído e adaptado de Anderson *et al.*, 1998]

Existem algumas formulações para a determinação da altura de água  $h$ : França em 1998, Gallaway em 1979 e posteriormente em 1998 (Anderson *et al.*, 1998), são exemplos dessas formulações.

Nessas fórmulas é o seguinte o significado e o valor estimado dos símbolos:

$\varepsilon_1$  é função de  $H/S$ , sendo proporcional à altura de areia. O coeficiente de proporcionalidade varia com a tipologia da camada de desgaste. De acordo com Lucas (1969):

no caso do Betão Betuminoso:

$$\varepsilon_1 = 3,5 \times H/S \quad (2.2)$$

no Revestimento Superficial Betuminoso:

$$\varepsilon_1 = 2,5 \times H/S \quad (2.3)$$

e no Betão Betuminoso Drenante:

$$\varepsilon_1 = 2,0 \times H/S \quad (2.4)$$

A expressão de França (1988), evidencia:

$$h = \left( \frac{l \cdot ip}{K \cdot \left(\sin \frac{\alpha}{2}\right)^{2/3} \cdot p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{\varepsilon_1}{2} \quad (2.5)$$

Onde:

$h[m]$  – altura da lâmina de água acima do topo das asperezas;

$l[m]$  – desenvolvimento da linha de escoamento mais desfavorável;

$p[ ]$  – inclinação média da respetiva linha de escoamento;

$ip[m \cdot s^{-1}]$  – intensidade de precipitação;

$K [m^{1/3} \cdot s^{-1}]$  – coeficiente de rugosidade;

$\alpha [^\circ]$  – ângulo das asperezas do pavimento, de acordo com França igual a  $60^\circ$  para as camadas de desgaste aqui tratadas;

$\varepsilon_1 [m]$  – altura das asperezas.

As expressões de Gallaway 1979 e 1998 (Anderson *et al.*, 1998) são, respetivamente:

$$h = 0,01485 \cdot H/S^{0,11} \cdot l^{0,43} \cdot ip^{0,59} \cdot p^{-0,42} - H/S \quad (2.6)$$

$$h = 0,01888 \cdot H/S^{0,125} \cdot l^{0,519} \cdot ip^{0,562} \cdot p^{-0,364} - H/S \quad (2.7)$$

Onde:

$h [mm]$  – altura da lâmina de água acima do topo das asperezas;

$l [m]$  – desenvolvimento da linha de escoamento mais desfavorável;

$p [^\circ]$  – inclinação média da respetiva linha de escoamento;

$ip [mm \cdot h^{-1}]$  – intensidade de precipitação;

$H/S [mm]$  – altura de areia no respetivo ensaio.

## 2.2.6. VELOCIDADE

A velocidade do veículo tem uma grande influência no potencial de hidroplanagem. Quanto maior a velocidade, maior será a extensão da película de água que penetra na área de contacto, devido aos efeitos da viscosidade e inércia do fluido. Assim, na medida em que aumenta a velocidade do veículo diminui a área de contacto direto entre o pneu e o pavimento, reduzindo o atrito disponível e aumentando a probabilidade de hidroplanagem (Filho, 2006).

A velocidade a que ocorre a hidroplanagem, a velocidade crítica de hidroplanagem, pode ser determinada recorrendo às equações de Agrawal e Gallaway. Estas equações foram desenvolvidas em unidades britânicas. No entanto são apresentadas as equações já convertidas para unidades métricas, segundo França (1988).

Gallaway (válida para valores de  $h > 2,413$  mm):

$$V = 4,580 \times (1,181 \times \varepsilon_1 + 1)^{0,06} \times A \quad (2.8)$$

Com A igual ao maior valor entre  $A_1$  e  $A_2$ :

$$A_1 = \frac{12,639}{h^{0,06}} + 3,507 \quad (2.9)$$

$$A_2 = \left( \frac{22,35}{h^{0,06}} - 4,970 \right) \times H/S^{0,14} \quad (2.10)$$

Agrawall (válida para valores de  $h < 2,413$  mm):

$$V = 96,899 \times h^{-0,259} \quad (2.11)$$

Onde:

V [km/h] – velocidade crítica de hidroplanagem;

$\varepsilon_1$  [mm] – altura das asperezas do pavimento;

h [mm] – altura do filme de água acima do topo das asperezas do pavimento;

H/S [mm] – altura de areia do respetivo ensaio.

Esta velocidade deve ser tida em conta aquando da execução do projeto, pois deverá ser suficientemente superior à velocidade que se espera que os veículos venham a praticar em condições pluviométricas que não conduzam a reduções voluntárias da velocidade.

#### 2.2.7. PNEUS

A pressão dos pneus influencia a velocidade de hidroplanagem. Quanto maior a pressão, maior a rigidez do pneu, logo o pneu deforma-se menos perante as forças hidrodinâmicas, e não há tanta penetração de água na área de contacto entre este e o pavimento. Ou seja, com o aumento da pressão dos pneus, aumenta a velocidade crítica de hidroplanagem.

A largura do pneu também influencia a velocidade de hidroplanagem. Quanto maior a largura do pneu, mais difícil será a expulsão da água presente no pavimento, logo, maiores serão as forças hidrodinâmicas e consequentemente menor será a velocidade crítica de hidroplanagem.

O rasto do pneu é outro fator que influencia a velocidade de hidroplanagem. O seu desenho adequado, associado à profundidade das ranhuras, pode facilitar a expulsão da água, aumentando a velocidade de hidroplanagem.

O tipo de formação estrutural do pneu, radial ou diagonal, faz com que o pneu se comporte de diferentes formas. Como se pode ver na Fig. 2.6, a área de contacto pneu-pavimento é menor num pneu diagonal, o que faz com que a velocidade crítica de hidroplanagem aumente quando é usado este tipo de pneu.

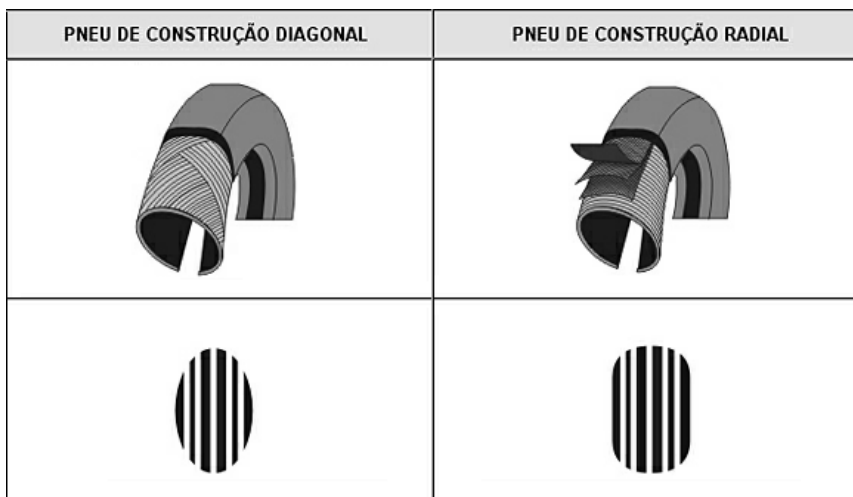


Fig. 2.6 – Pneu diagonal e pneu radial (estrutura e impressão).

### 2.2.8. ÓRGÃOS DE DRENAGEM

Para intersetar as linhas de corrente e encurtar o seu comprimento, podem ser usadas caleiras embutidas no pavimento. Estas são responsáveis por eliminar rapidamente a água da superfície, encaminhando-a para as valetas. Não interferindo diretamente nas expressões (2.5), (2.6) e (2.7) não farão parte do âmbito deste trabalho.

### 2.2.9. MODELOS DE DISFARCE DE SOBREELEVAÇÃO

Para maior segurança no descrever das curvas, estas estão dotadas de uma inclinação transversal descendente para o intradorso da curva, a sobrelevação, para compensar em parte a aceleração centrífuga. Temos então perfis transversais diferentes em curva e em alinhamento reto. Para fazer a transição em planta entre esses dois elementos, usamos uma outra curva de raio hiperbolicamente variável, a clotóide. Em perfil transversal também é necessário fazer a transição entre os dois elementos, fazer variar a inclinação transversal de uma forma segura e cómoda, ou seja, fazer um disfarce de sobrelevação adequado.

O caso mais simples é fazer variar a sobrelevação de uma forma linear, o que é adequado para estradas de duas vias, mas não para estradas de vias múltiplas, onde as larguras de faixa são maiores, a velocidade dos veículos é bastante superior e, conseqüentemente, onde o risco de hidroplanagem é mais elevado.

Sempre que o modelo utilizado provoque aumento de inclinação média na zona de inversão de sobrelevação pode dizer-se que o risco de hidroplanagem se reduz. É o caso dos denominados modelos parabólicos de 3º grau para o disfarce da sobrelevação.

#### 2.2.9.1. Modelo de Disfarce Linear

Este modelo é apenas adequado para estradas de duas vias, uma vez que o risco de hidroplanagem é reduzido por ser pequena a largura da via e berma de extradorso, contribuintes com as águas pluviais. Considera-se que a rotação é efetuada em torno do eixo para atenuar a amplitude das alturas dos bordos.

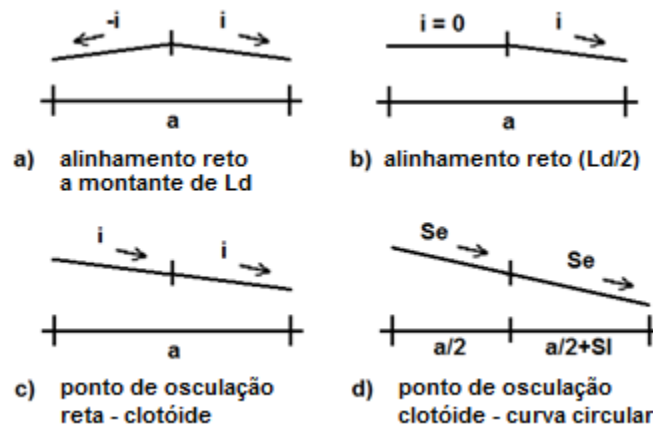


Fig. 2.7 – Perfis transversais característicos de uma estrada de duas vias.

Como se pode acompanhar na Fig. 2.8, neste modelo a sobrelevação vai aumentando linearmente à medida que o raio vai diminuindo, o disfarce começa a ser feito em alinhamento reto a uma distância  $L_d$  do ponto de osculação entre a reta e a clotóide. Aí a inclinação transversal é igual e simétrica nas duas vias (Fig. 2.7 a)). A situação de anulamento da inclinação transversal (Fig. 2.7 b)) dá-se em alinhamento reto, e é no ponto de osculação entre a reta e a clotóide que toda a faixa de rodagem fica com a mesma inclinação transversal (Fig. 2.7 c)). No ponto de osculação entre a clotóide e a curva circular é atingida a sobrelevação desejada (Fig. 2.7 d)). Se a curva tiver um raio inferior a 200 m existirá uma sobrelargura  $SI$  na via de intradorso, variando linearmente ao longo da clotóide, atingindo o seu valor máximo no início da curva circular e mantendo-se constante durante toda a curva.

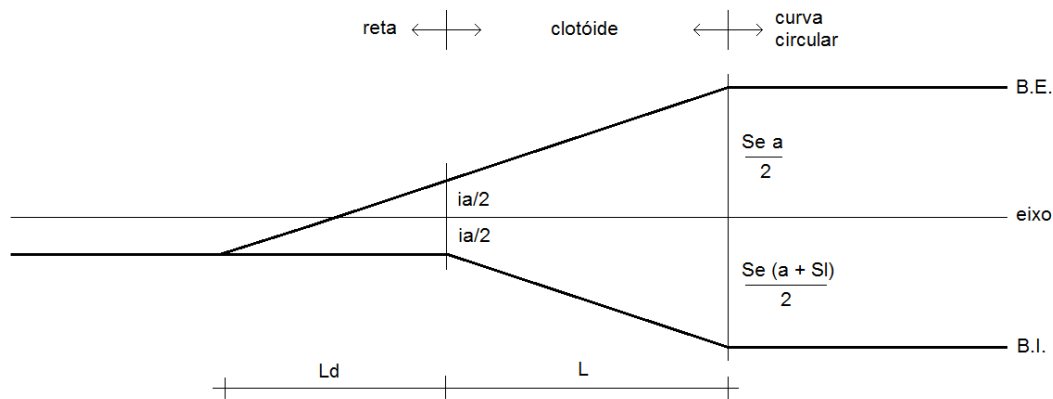


Fig. 2.8 – Modelo de disfarce de sobrelevação linear.

#### 2.2.9.2. Modelo de Disfarce Parabólico de 3º Grau (Tipo I)

Nas estradas de vias múltiplas o risco de hidroplanagem é superior devido às maiores larguras de faixa e às maiores velocidades praticadas pelos veículos. Então adota-se um modelo de sobrelevação que conduz a maiores inclinações longitudinais para reduzir esse risco.

A separação das faixas de rodagem possibilita leis de disfarce diferentes nas faixas de intradorso e extradorso. Uma vez que a inclinação transversal na faixa de intradorso é sempre superior a  $i$  (em módulo), o risco de hidroplanagem está acautelado, logo pode usar-se um modelo linear de disfarce.

Em extradorso a situação é diferente, a inclinação transversal é invertida e, portanto, anulada. Adotam-se então modelos não lineares, modelos parabólicos do 3º grau (Francisco, 2009).

Como existe um separador central, considera-se que a rotação é efetuada em torno dos bordos que estão junto ao referido separador, bordos interiores, para evitar grandes inclinações no separador que dificultam a construção, e para aumentar a sua resistência a choques durante o período de vida da obra.

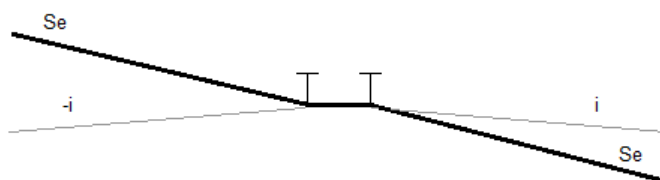


Fig. 2.9 – Rotação em torno dos bordos interiores em estradas de vias múltiplas.

Este modelo, em comparação com o linear, apresenta uma maior inclinação longitudinal  $\delta$  na zona de anulamento da inclinação transversal, o que é uma mais valia, pois diminui o risco de hidroplanagem. Outra vantagem em relação ao modelo linear, é o facto de não haver descontinuidade a nível da inclinação longitudinal, quer no ponto de osculação da reta com a clotóide, quer no ponto de osculação da clotóide com a curva circular. Mas neste modelo o disfarce é efetuado em clotóide, entre a sobrelevação zero e  $i$ .

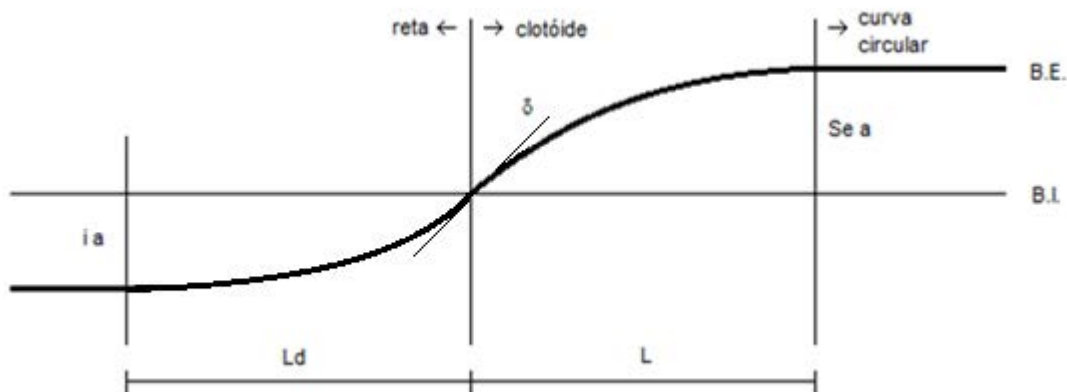


Fig. 2.10 – Modelo de disfarce de sobrelevação parabólico de 3º grau (tipo I).

### 2.2.9.3. Modelo de Disfarce Parabólico de 3º Grau (Tipo II)

Este modelo tem também o objetivo de aumentar a inclinação longitudinal no ponto de anulação da inclinação transversal e de fazer coincidir o perfil horizontal com o ponto de osculação entre a reta e a clotóide, mas permite a escolha de  $\delta$ . Na verdade, permite a escolha de  $\delta$  e  $\delta'$ , já que este modelo é definido por duas expressões, uma relativa a  $L_d$  e outra relativa à clotóide.

Consegue-se assim um aumento da inclinação média da linha de corrente mais desfavorável, o que se traduz na redução do risco de hidroplanagem, atuando o projetista no valor de  $\delta$ .

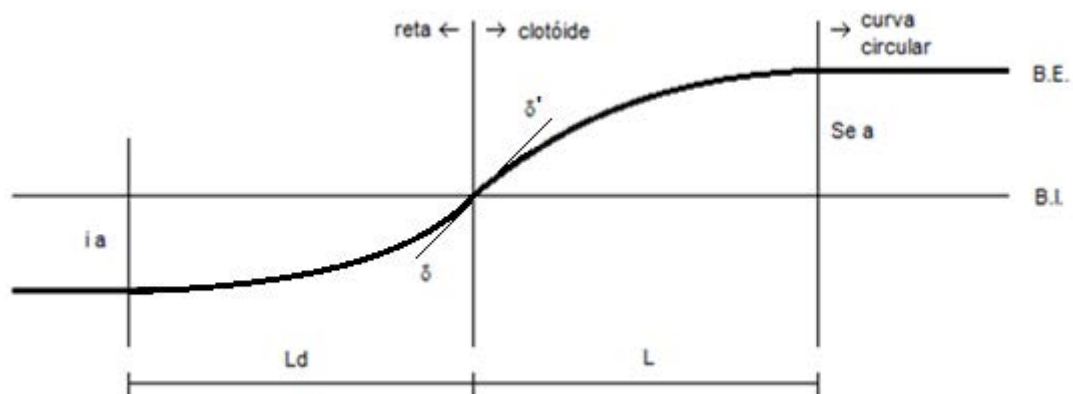


Fig. 2.11 – Modelo de disfarce de sobrelevação parabólico de 3º grau (tipo II).

Os fatores acima apresentados não têm todos a mesma influência, e diferentes autores têm diferentes opiniões sobre o peso a atribuir a cada um.

# 3

## A INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DOS PAVIMENTOS

### 3.1. INTRODUÇÃO

Ao longo do Capítulo 2 foram seriados os fatores que têm influência na ocorrência do fenómeno de hidroplanagem.

Dos que aí foram seriados interessa, no âmbito da presente dissertação, destacar aqueles que intervêm nas expressões de cálculo da altura de água acima do topo das asperezas do pavimento, valor que mais diretamente intervêm nas equações de Gallaway e Agrawall, que permitem o cálculo da velocidade de início do fenómeno da hidroplanagem. As expressões que aqui serão objeto de particular atenção serão a de França de 1988 indicada em (3.1) e a de Gallaway de 1998 indicada em (3.2):

$$h = \left( \frac{l \cdot ip}{K \cdot (0,5)^{2/3} \cdot p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{\varepsilon_1}{2} \quad (3.1)$$

$$h = 0,01888 \cdot H/S^{0,125} \cdot l^{0,519} \cdot ip^{0,562} \cdot p^{-0,364} - H/S \quad (3.2)$$

O significado dos símbolos e respetivas unidades já foram apresentados nas páginas 8 e 9.

Neste capítulo e nos seguintes, só se estudarão as expressões (3.1) e (3.2), pois a expressão de Gallaway de 1979 é mais antiga. Aqui procurar-se-á verificar e comparar os valores obtidos das duas expressões (3.1 e 3.2), mantendo fixas a intensidade de precipitação, a extensão e declive das linhas de escoamento e procurando variar a rugosidade dos pavimentos que nas expressões se pode traduzir por três parâmetros:  $H/S$ ,  $\varepsilon_1$  e  $K$ .

### 3.2. FATORES AFETOS À RUGOSIDADE E AS SUAS RELAÇÕES

Ao longo do presente trabalho, considerou-se útil que as expressões da altura de água fossem aplicadas a três tipologias de camadas de desgaste:

- Betão Betuminoso (0/14) – BB;
- Betão betuminoso drenante (0/2 – 6/14) – BBD;
- Revestimento superficial betuminoso com gravilha de 14 mm – RSB.

No que aos fatores relacionados com a rugosidade diz respeito foram testados os valores de H/S constantes do Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Valores de H/S testados.

Camada de Desgaste	H/S [mm]
BB	0,6 ; 0,7 ; 0,8
BBD	0,8 ; 1,0 ; 1,2
RSB	1,5 ; 2,0 ; 2,5

Desde a década de 70 do século passado que são publicados trabalhos práticos que visam relacionar a expressão média da altura das rugosidades ( $\varepsilon_1$ ) e os resultados dos respetivos ensaios da altura de areia. São os casos das investigações de Brengarth e Laganier (1983) ou J. Lucas (1969), trabalhos expostos nas publicações do LCPC e que se revelam bastante coerentes. Aí:

$$\varepsilon_1 = a H/S \quad (3.3)$$

Em que a constante a assume nessas publicações os valores transcritos no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Valores de  $\varepsilon_1$ .

Camada de Desgaste	a	$\varepsilon_1$ [mm]	H/S [mm]
BB	3,5	2,1 ; 2,45 ; 2,8	0,6 ; 0,7 ; 0,8
BBD	2,5	2,0 ; 2,5 ; 3,0	0,8 ; 1,0 ; 1,2
RSB	2,0	3,0 ; 4,0 ; 5,0	1,5 ; 2,0 ; 2,5

Para o cálculo do coeficiente K de Manning, que é necessário na expressão (3.1), utilizou-se a publicação da Pennsylvania Transportation Institute, de Junho de 1998, da autoria de Anderson *et al.*. Nesta publicação é fornecido o valor de  $n = \frac{1}{K}$ , considerando valores distintos para diferentes intensidades de precipitação e várias extensões das linhas de corrente. Foi aqui possível utilizar um valor médio para cada tipo de camada de desgaste, dado não existirem grandes desvios em relação a essa média e, porque, desse modo foi possível isolar a rugosidade (onde se inclui K) dos restantes parâmetros (ip, l e p).

Os valores adaptados foram os constantes do Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Valores de K.

Camada de Desgaste	K [m <sup>1/3</sup> s <sup>-1</sup> ]
BB	40
BBD	25
RSB	25

### 3.3. EXPRESSÕES A COMPARAR

No

Quadro 3.4 encontram-se as expressões finais a utilizar, com origem na equação (3.1) de França (1988).

Quadro 3.4 – Aplicação Concreta da Expressão (3.1).

Camada de Desgaste	H/S [mm]	ε <sub>1</sub> [mm]	K [m <sup>1/3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Expressão
BB a = 3,5	0,6	2,1	40	$h = \left( \frac{l \times ip}{40 \times 0,63 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,0021}{2}$
	0,7	2,45		$h = \left( \frac{l \times ip}{40 \times 0,63 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,00245}{2}$
	0,8	2,8		$h = \left( \frac{l \times ip}{40 \times 0,63 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,0028}{2}$
BBD a = 2,5	0,8	2,0	25	$h = \left( \frac{l \times ip}{25 \times 0,63 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,002}{2}$
	1,0	2,5		$h = \left( \frac{l \times ip}{25 \times 0,63 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,0025}{2}$
	1,2	3,0		$h = \left( \frac{l \times ip}{25 \times 0,63 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,003}{2}$
RSB a = 2,0	1,5	3,0	25	$h = \left( \frac{l \times ip}{25 \times 0,63 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,003}{2}$
	2,0	4,0		$h = \left( \frac{l \times ip}{25 \times 0,63 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,004}{2}$
	2,5	5,0		$h = \left( \frac{l \times ip}{25 \times 0,63 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,005}{2}$

No Quadro 3.5, ajustou-se a expressão (3.2) de Gallaway aos valores concretos a testar para a rugosidade.

Quadro 3.5 – Aplicação Concreta da equação (3.2)

Camada de Desgaste	H/S [mm]	Expressão
BB $a = 3,5$	0,6	$h = 0,01771 \times [l^{0,519} \times ip^{0,562} \times p^{-0,364}] - 0,6$
	0,7	$h = 0,01806 \times [l^{0,519} \times ip^{0,562} \times p^{-0,364}] - 0,7$
	0,8	$h = 0,01836 \times [l^{0,519} \times ip^{0,562} \times p^{-0,364}] - 0,8$
BBD $a = 2,5$	0,8	$h = 0,01836 \times [l^{0,519} \times ip^{0,562} \times p^{-0,364}] - 0,8$
	1,0	$h = 0,01888 \times [l^{0,519} \times ip^{0,562} \times p^{-0,364}] - 1,0$
	1,2	$h = 0,01932 \times [l^{0,519} \times ip^{0,562} \times p^{-0,364}] - 1,2$
RSB $a = 2,0$	1,5	$h = 0,01978 \times [l^{0,519} \times ip^{0,562} \times p^{-0,364}] - 1,5$
	2,0	$h = 0,02059 \times [l^{0,519} \times ip^{0,562} \times p^{-0,364}] - 2,0$
	2,5	$h = 0,02117 \times [l^{0,519} \times ip^{0,562} \times p^{-0,364}] - 2,5$

Para se poder estudar a influência da rugosidade do pavimento, comparar-se-ão valores de altura de água e velocidades de início de hidroplanagem, considerando-se os seguintes valores constantes:

$$l = 35 \text{ m}$$

$$p = 0,01$$

$$ip = 10 \text{ mm/h}$$

Quadro 3.6 – Comparação de h e V para diferentes rugosidades.

Camada de Desgaste	H/S [mm]	$\epsilon_1$ [mm]	K [ $\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ ]	França 1988		Gallaway 1998	
				h [mm]	V [km/h]	h [mm]	V [km/h]
BB $a = 3,5$	0,6	2,1	40	1,198	92	1,586	86
	0,7	2,45		1,023	96	1,528	87
	0,8	2,8		0,848	101	1,466	88
BBD $a = 2,5$	0,8	2,0	25	1,981	81	1,466	88
	1,0	2,5		1,731	84	1,330	90
	1,2	3,0		1,481	88	1,184	93
RSB $a = 2,0$	1,5	3,0	25	1,481	88	0,951	98
	2,0	4,0		0,981	97	0,541	114
	2,5	5,0		0,481	117	0,113	170

Como todos os valores da altura de água são inferiores a 2,413 mm, a velocidade de início de hidroplanagem foi calculada a partir da expressão de Agrawall.

O revestimento superficial betuminoso é muito abrasivo para os pneus, não sendo portanto adequado para as autoestradas, devido em grande parte às velocidades aí praticadas pelos condutores. Esta camada de desgaste só será alvo de análise neste capítulo.

Quanto maior é o valor de ensaio da altura de areia  $H/S$  e consequentemente, quanto maior o valor de  $\varepsilon_1$ , menor a altura de água  $h$ , e maior a velocidade de início de hidroplanagem. Os parâmetros  $\varepsilon_1$  e  $K$  só entram na expressão de França (1988). Quanto menor for o coeficiente de escoamento,  $K$ , maior será a altura de água acima das asperezas do pavimento, e consequentemente menor será a velocidade de início da hidroplanagem. Com  $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  as alturas de água dadas por Gallaway são maiores do que as dadas por França. Já com  $K = 25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  as alturas de água dadas por Gallaway são inferiores às dadas por França.

Os resultados mais semelhantes entre as duas expressões verificam-se para o BBD, onde as diferenças entre as expressões são da ordem dos 5 ou 6 km/h. Os valores mais discrepantes verificam-se no RSB, onde a discrepância entre as expressões atinge os 50 km/h. As expressões não são adequadas para o cálculo da altura de água no RSB.

Analisando os resultados da expressão de França, é possível observar que o betão betuminoso permite maiores velocidades sem que ocorra a hidroplanagem, para Gallaway isso já não acontece, o que parece ter mais lógica. Talvez o valor de  $K$  retirado dos estudos de Anderson esteja um pouco exagerado para o betão betuminoso, o que justifica o facto da altura de água dada pela expressão de França para esse material, serem inferiores aos obtidos para o betão betuminoso drenante.

Também se pode observar nos resultados da expressão de França, que o BBD com  $H/S = 1,2 \text{ mm}$  apresenta o mesmo  $\varepsilon_1$  que o RSB com  $H/S = 1,5 \text{ mm}$ , como também apresentam o mesmo  $K$ , as alturas de água e consequentes velocidades são iguais para estes dois tipos de camadas de desgaste, para chuvadas equivalentes iguais. Note-se que parte da chuvada, no caso do BBD é absorvida pelos canalículos que existem no interior da mistura betuminosa.



# 4

## A INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO

### 4.1. INTRODUÇÃO

O fator meteorológico é o único que, sendo contribuinte da hidroplanagem não tem aparentemente qualquer influência por parte do condutor. Na realidade o condutor poderá optar por reduzir a velocidade ou até parar enquanto decorre uma chuvada de maior intensidade. Em concordância com esta realidade e, apesar de, teoricamente, fortes intensidades de precipitação tenderem a acumular mais água sobre o pavimento, é de notar que a generalidade dos autores que a este assunto se têm dedicado (Pennsylvania Transportation, Agrawall, Gallaway, Rose e França) tendem a concordar que chuvadas demasiado intensas ( $ip > 25$  mm/h) levam a conduções muito lentas, ou até à paragem das viaturas, por manifesta falta de visibilidade e/ou perceção do perigo por parte dos condutores. Assim a análise dever-se-á efetuar para chuvadas de intensidade média entre os 10 e os 25 mm/h, já que são estas as que verdadeiramente tendem a provocar hidroplanagem.

O estudo incidirá para as quatro intensidades múltiplas de 5 mm/h entre 10 e 25 mm/h. Estas chuvadas são, em regra, suficientes para despoletar a ocorrência do fenómeno, desde que se juntem condições desfavoráveis de outros fenómenos.

### 4.2. EXPRESSÕES A COMPARAR

Mantém-se aqui o princípio de comparar as expressões (3.1) e (3.2) para efeito de cálculo da altura de água e as equações de Gallaway e Agrawall para o cálculo da velocidade de início do fenómeno de hidroplanagem.

Considerar-se-ão as rugosidades médias de cada camada de desgaste. A adaptação às diferentes pluviosidades exigirá a constituição dos Quadro 4.1 e Quadro 4.2.

Quadro 4.1 – Influência da precipitação. Expressão (3.1)

Camada de Desgaste	H/S [mm]	$\varepsilon_1$ [mm]	K [ $m^{1/3} s^{-1}$ ]	ip [mm/h]	Expressão
BB $a = 3,5$	0,7	2,45	40	10	$h = \left( \frac{l \times 10 \times 10^{-3}}{40 \times 0,63 \times 3600 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,00245}{2}$
				15	$h = \left( \frac{l \times 15 \times 10^{-3}}{40 \times 0,63 \times 3600 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,00245}{2}$
				20	$h = \left( \frac{l \times 20 \times 10^{-3}}{40 \times 0,63 \times 3600 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,00245}{2}$
				25	$h = \left( \frac{l \times 25 \times 10^{-3}}{40 \times 0,63 \times 3600 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,00245}{2}$
BBD $a = 2,5$	1,0	2,5	25	10	$h = \left( \frac{l \times 10 \times 10^{-3}}{25 \times 0,63 \times 3600 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,0025}{2}$
				15	$h = \left( \frac{l \times 15 \times 10^{-3}}{25 \times 0,63 \times 3600 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,0025}{2}$
				20	$h = \left( \frac{l \times 20 \times 10^{-3}}{25 \times 0,63 \times 3600 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,0025}{2}$
				25	$h = \left( \frac{l \times 25 \times 10^{-3}}{25 \times 0,63 \times 3600 \times p^{1/2}} \right)^{0,6} - \frac{0,0025}{2}$

Quadro 4.2 – Influência da precipitação. Expressão (3.2)

Camada de Desgaste	H/S [mm]	ip [mm/h]	Expressão
BB $a = 3,5$	0,7	10	$h = 0,06624 \times [l^{0,519} \times p^{-0,364}] - 0,7$
		15	$h = 0,08273 \times [l^{0,519} \times p^{-0,364}] - 0,7$
		20	$h = 0,09728 \times [l^{0,519} \times p^{-0,364}] - 0,7$
		25	$h = 0,1102 \times [l^{0,519} \times p^{-0,364}] - 0,7$
BBD $a = 2,5$	1,0	10	$h = 0,06887 \times [l^{0,519} \times p^{-0,364}] - 1,0$
		15	$h = 0,08649 \times [l^{0,519} \times p^{-0,364}] - 1,0$
		20	$h = 0,1017 \times [l^{0,519} \times p^{-0,364}] - 1,0$
		25	$h = 0,1153 \times [l^{0,519} \times p^{-0,364}] - 1,0$

Considerando constantes os valores da extensão e da inclinação da linha de escoamento,  $l = 35 m$  e  $p = 0,01$ , virá:

Quadro 4.3 – Comparação de h e V para diferentes intensidades de precipitação.

Camada de Desgaste	H/S [mm]	ip [mm/h]	França 1988		Galloway 1998	
			h [mm]	V [km/h]	h [mm]	V [km/h]
BB $a = 3,5$	0,7	10	1,023	96	1,528	87
		15	1,642	85	2,099	80
		20	2,183	79	2,590	77
		25	2,671	77	3,030	76
BBD $a = 2,5$	1,0	10	1,731	84	1,330	90
		15	2,552	80	1,926	82
		20	3,268	79	2,440	81
		25	3,915	78	2,900	80

Para o cálculo da velocidade de início de hidroplanagem foram usadas as expressões (2.8) de Galloway para valores de  $h > 2,413 \text{ mm}$  e (2.11) de Agrawall para valores de  $h < 2,413 \text{ mm}$ .

Quanto maior a intensidade de precipitação, maior é a altura de água e consequentemente, menor a velocidade que se pode praticar sem que haja hidroplanagem.

Um aumento de 5 mm/h da intensidade de precipitação faz aumentar em média entre 0,5 mm e 0,8 mm na altura de água no pavimento.

Para grandes intensidades de precipitação as velocidades de início de hidroplanagem são bastante semelhantes. Como as alturas de água são elevadas, maiores que 2,413 mm, é usada a expressão de Galloway para o cálculo da velocidade. Esta expressão retorna valores muito próximos para diferentes alturas de água, ao contrário da expressão de Agrawall que retorna velocidades bem distintas, mesmo para valores de altura de água próximos.

Os valores de Galloway são mais conservativos para o BB, enquanto os de França são mais conservativos para o BBD, o que já foi discutido e justificado no capítulo anterior.



# 5

## A INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO TRAÇADO

### 5.1. INTRODUÇÃO

No cálculo das alturas de água acima da crista das asperezas do pavimento, intervém de forma relevante a geometria do traçado através da extensão das linhas de escoamento e da sua inclinação.

A extensão das vias de escoamento está associada à largura das semiplataformas das vias. Em estradas de duas vias, desde que corretamente perfiladas, o fenómeno da hidroplanagem é difícil de ocorrer, exatamente devido à fraca largura da via e berma de extradorso que se constituirá como bacia hidrográfica da chuvada. Já nas rodovias com faixas separadas, cada uma delas tem uma largura muito mais significativa, tornando-se com frequência a faixa de extradorso à entrada ou à saída das curvas (inclinações transversais reduzidas) os locais mais perigosos face a este tipo de ocorrência. A faixa de intradorso, porque é sempre provida de uma inclinação transversal mínima igual a 2,5%, fica usualmente livre de ocorrência da hidroplanagem.

Os pontos mais críticos das estradas de vias múltiplas são aqueles onde o extradorso possui uma inclinação nula. Este semiperfil longitudinal não é evitável já que, nas entradas e saídas das curvas, há que inverter, no extradorso, o sinal da inclinação transversal, de modo a transformar o caimento para o exterior, típico do alinhamento reto, no perfil com caimento para o interior, próprio das curvas, de modo a combater o efeito negativo da força centrífuga.

Então, nestes locais na vizinhança do perfil horizontal, a variação do sinal da sobrelevação vai possibilitar que as águas pluviais que caem sobre o pavimento fluam segundo as linhas de maior declive que, em cada ponto, são a combinação da inclinação transversal com a inclinação longitudinal. A Fig. 2.4 ilustra o comportamento das linhas de escoamento nessa vizinhança do perfil horizontal, gerando linhas de corrente com extensões superiores às que ocorrem noutros locais da rodovia.

Acresce que, sendo as inclinações transversais muito pequenas o tempo de escoamento ampliar-se-á e, como consequência, a altura de água tenderá a subir.

### 5.2. EXTENSÃO DAS LINHAS DE ESCOAMENTO

O cálculo rigoroso das extensões das linhas de corrente deverá ser avaliado em cada caso concreto. De facto, a combinação das inclinações transversal e longitudinal ditará em cada situação o percurso e extensão das linhas de fluxo. Essa avaliação rigorosa está, portanto, fora do âmbito do presente trabalho dado que aqui se pretende avaliar de forma genérica a influência dessa extensão no risco de hidroplanagem e não experimentar a infinita multiplicidade de combinações de inclinações

longitudinais e transversais. Assim, optou-se por considerar que, na zona de inversão de sobrelevação, o percurso das águas da chuva geradora da maior linha de escoamento descreve uma semicircunferência de raio igual à soma das larguras da faixa e das bermas (interior e exterior). Na realidade a figura gerada é mais semelhante a uma semielipse, mas a relação da grandeza dos eixos desta são desconhecidos no caso geral, pois dependem da inclinação longitudinal e da lei de variação da inclinação transversal. A opção pela semicircunferência vai permitir uma razoável aproximação e, simultaneamente, fazer intervir a largura da semiplataforma.

### 5.3. INCLINAÇÃO

#### 5.3.1. PREÂMBULO

Na tentativa de reduzir o número de ensaios a realizar, optou-se por considerar a inclinação longitudinal sempre igual a 0,5%, que será a mínima regulamentar e, por isso, a inclinação que causará as situações mais desfavoráveis.

Quanto às inclinações transversais decidiu-se fazer dois ensaios relevantes: variação da sobrelevação linear e parabólica do 3º grau (tipo II).

#### 5.3.2. INCLINAÇÃO TRANSVERSAL COM VARIAÇÃO LINEAR DE SE

A Fig. 5.1, evidencia o que pode ser o esboço dos bordos exterior e interior da faixa de extradorso, supondo linear o modelo de disfarce utilizado. Para se proceder ao cálculo de inclinação média a utilizar, será necessário fixar uma extensão para a clotóide de transição e um valor para a sobrelevação a disfarçar.

Considere-se que L (extensão da clotóide) é igual a 100m e a sobrelevação na curva circular de 5%. Adotar-se-á o carater alfanumérico **a** para a largura da faixa de rodagem.

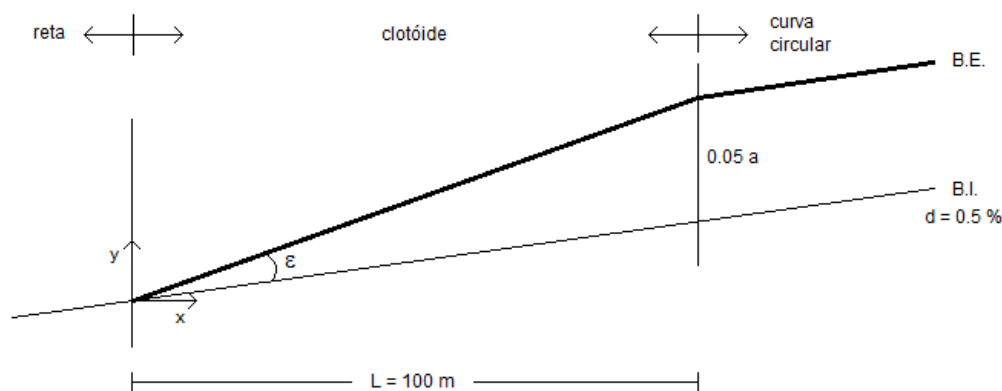


Fig. 5.1 – Perfil longitudinal do B.I. e B.E. com modelo de disfarce linear.

A lei de variação de sobrelevação em clotóide será dada pela expressão (5.1):

$$S_x = \frac{0,05}{100} \cdot x \quad (5.1)$$

A inclinação do bordo interior será:

$$i_{B.I.} = 0,005$$

A equação do bordo exterior no sistema de eixos do esboço, virá:

$$y = \left(0,005 + \frac{0,05 \times a}{100}\right) \cdot x \quad (5.2)$$

A inclinação do bordo exterior será dada por:

$$i_{B.E.} = y' = 0,005 + \frac{0,05 \times a}{100} \quad (5.3)$$

A Fig. 5.2 evidencia a mesma situação, mas analisada em planta e onde se esboçou o percurso da gota de água mais desfavorável, suposto como semicircunferência.

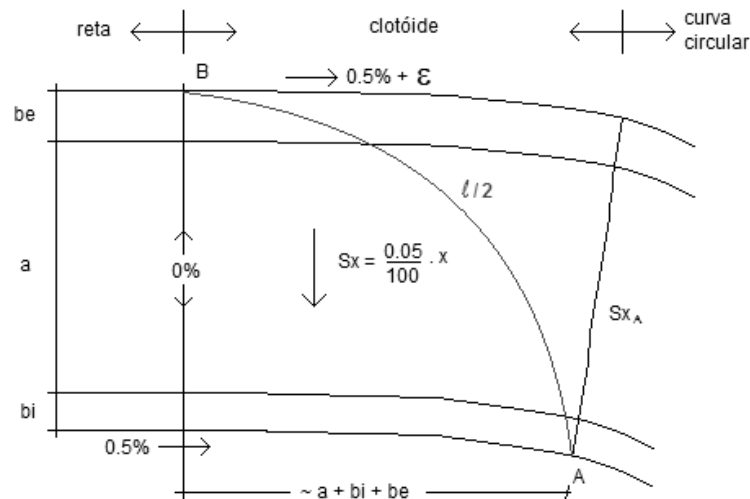


Fig. 5.2 – Planta da zona vizinha ao ponto de osculação entre o alinhamento reto e a clotóide.

Testar-se-ão os casos de 2x2 vias e 2x3 vias. No primeiro caso as dimensões de faixa e bermas serão:

$$a = 7,5 \text{ m}$$

$$bi \text{ (berma interior)} = 0,5 \text{ m}$$

$$be \text{ (berma exterior)} = 3,0 \text{ m}$$

$$a + bi + be = 11 \text{ m}$$

$$l \text{ (desenvolvimento da linha de fluxo)} = \times 11 \cong 35 \text{ m}$$

$$\varepsilon = \frac{0,05 \times a}{100} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon = \frac{0,05 \times 7,5}{100} = 0,375\%$$

No ponto A, que se situa no B.I., as inclinações longitudinal e transversal serão:

$$i_{l_A} = i_{B.I.} = 0,50\%$$

$$i_{t_A} = S_{x_A} = \frac{0,05}{100} \times 11 = 0,55\%$$

A inclinação da linha de escoamento no ponto A virá:

$$i_A = \sqrt{i_{l_A}^2 + i_{t_A}^2} \quad (5.5)$$

$$i_A = \sqrt{0,005^2 + 0,0055^2} = 0,74\%$$

Para o ponto B, que se situa no B.E.:

$$i_{l_B} = i_{B.E.} = 0,005 + \frac{0,05 \times 7,5}{100} \text{ (considerando o arco igual à tangente)} = 0,88\%$$

$$i_{t_B} = 0$$

$$i_B = 0,88\%$$

A inclinação média a considerar será idêntica caso se utilize a semicircunferência ou o quarto de circunferência da Fig. 5.2, desde que a lei de variação da sobrelevação se mantenha para montante.

Considerando  $i_m$  a média entre os valores extremos do quarto de circunferência, virá:

$$i_m = \frac{i_A + i_B}{2} \quad (5.6)$$

$$i_m = \frac{0,74\% + 0,88\%}{2} = 0,81\%$$

Para o caso das autoestradas do tipo 2x3 vias, as alterações a efetuar serão:

$$a = 11,25 \text{ m}$$

$$a + bi + be = 14,75 \text{ m}$$

$$l = \quad \times 14,75 \cong 47 \text{ m}$$

$$\varepsilon = \frac{0,05 \times 11,25}{100} = 0,563\%$$

$$S_{x_A} = \frac{0,05}{100} \times 14,75 = 0,74\%$$

$$i_A = \sqrt{0,005^2 + 0,0074^2} = 0,89\%$$

$$i_B = 0,005 + \frac{0,05 \times 11,25}{100} = 1,06\% \quad \text{e, finalmente}$$

$$i_m = 0,98\%$$

### 5.3.3. INCLINAÇÃO TRANSVERSAL COM VARIAÇÃO PARABÓLICA DE 3º GRAU PARA SE

Manter-se-ão idênticos todos os parâmetros utilizados para o disfarce linear, mas a lei de variação de sobrelevação é diferente:

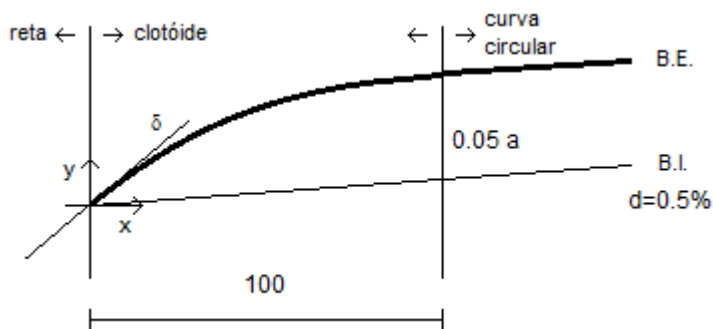


Fig. 5.3 – Perfil longitudinal do B.I. e B.E. com modelo parabólico de disfarce.

Equação da sobrelevação do B.E.:

$$S_x = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad (5.7)$$

Equação da linha do B.E.:

$$y = a \times S_x + i_{B.I.}x = i_{B.I.}x + a \times Ax^3 + a \times Bx^2 + a \times Cx + a \times D \quad (5.8)$$

Inclinação do B.I.:

$$i_{B.I.} = 0,5\%$$

Inclinação do B.E. (derivada da equação (5.8)):

$$y' = i_{B.I.} + 3aAx^2 + 2aBx + aC \quad (5.9)$$

Condições obrigatórias das equações:

$$x = 0 \rightarrow S_x = 0 \rightarrow \boxed{D = 0} \quad (5.10)$$

$$x = L \rightarrow S_x = AL^3 + BL^2 + CL = Se$$

$$x = L \rightarrow aS'_x = 3aAL^2 + 2aBL + aC = 0$$

$$x = 0 \rightarrow aS'_x = aC = \delta \rightarrow \boxed{C = \frac{\delta}{a}} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} & \left[ AL^3 + BL^2 + \frac{\delta L}{A} = Se \right] \times (-2) \\ & \left[ 3AL^2 + 2BL + \frac{\delta}{a} = 0 \right] \times L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -2AL^3 - 2BL^2 &= -2 \times \left( Se - \frac{\delta L}{a} \right) \\ 3AL^3 + 2BL^2 &= -\frac{\delta L}{a} \end{aligned}$$

---


$$AL^3 = \frac{\delta L}{a} - 2 \times Se$$

$$A = \frac{\delta L - 2a \times Se}{aL^3} \quad (5.12)$$

$$3 \times \frac{\delta L - 2a \times Se}{aL^3} L^2 + 2BL + \frac{\delta}{a} = 0$$

$$3\delta L - 6aSe + 2aBL^2 + \delta L = 0$$

$$4\delta L - 6aSe = -2aBL^2$$

$$B = \frac{6aSe - 4\delta L}{2aL^2} \quad (5.13)$$

Substituindo as equações (5.10), (5.11), (5.12) e (5.13) na equação (5.7) vem:

Equação da sobrelevação do B.E.:

$$S_x = \frac{\delta L - 2aSe}{aL^3} x^3 + \frac{6aSe - 4\delta L}{2aL^2} x^2 + \frac{\delta}{a} x \quad (5.14)$$

Substituindo as equações (5.10), (5.11), (5.12) e (5.13) na equação (5.8) vem:

Equação da linha do B.E.:

$$y = i_{B.I.} x + \frac{\delta L - 2a \times Se}{L^3} x^3 + \frac{6aSe - 4\delta L}{2L^2} x^2 + \delta x \quad (5.15)$$

Substituindo as equações (5.10), (5.11), (5.12) e (5.13) na equação (5.9) vem:

Inclinação da linha do B.E.:

$$y' = i_{B.I.} + 3 \frac{\delta L - 2a \times Se}{L^3} x^2 + 2 \frac{6aSe - 4\delta L}{2L^2} x + \delta \quad (5.16)$$

Considerando  $\delta = 0,8\%$ , e retomando as duas plataformas em estudo, teremos, para o caso de 2x2 vias:

$$a = 7,5 \text{ m}$$

$$a + bi + be = 11 \text{ m}$$

$$l \cong 35 \text{ m}$$

$$i_{l_A} = 0,50\%$$

$$i_{t_A} = S_{x_A} = \frac{0,008 \times 100 - 2 \times 7,5 \times 0,05}{7,5 \times 100^3} \times 11^3 + \frac{6 \times 7,5 \times 0,05 - 4 \times 0,008 \times 100}{2 \times 7,5 \times 100^2} \times 11^2 + \frac{0,008}{7,5} \times 11 = 1,10\%$$

$$i_A = \sqrt{0,50^2 + 1,10^2} = 1,21\%$$

$$i_{l_B} = 0,50\% + 0,80\% = 1,30\%$$

$$i_{t_B} = 0$$

$$i_B = 1,30\%$$

$$i_m = 1,26\%$$

Para o caso das autoestradas do tipo 2x3 vias, virá:

$$a = 11,25 \text{ m}$$

$$a + bi + be = 14,75 \text{ m}$$

$$l = \times 14,75 \cong 47 \text{ m}$$

$$i_{l_A} = 0,50\%$$

$$i_{t_A} = 1,06\%$$

$$i_A = \sqrt{0,50^2 + 1,06^2} = 1,17\%$$

$$i_{l_B} = 0,50\% + 0,80\% = 1,30\%$$

$$i_{t_B} = 0$$

$$i_B = 1,30\%$$

$$i_m = 1,24\%$$

Os valores encontram-se resumidos no Quadro 5.1:

Quadro 5.1 – Inclinação média da linha de escoamento com  $\delta=0,8\%$ .

		2x2 vias		2x3 vias	
		Ponto A	Ponto B	Ponto A	Ponto B
Modelo linear	$i_l$	0,50%	0,88%	0,50%	1,06%
	$i_t$	0,55%	0%	0,74%	0%
	$i$	0,74%	0,88%	0,89%	1,06%
	$i_m$	0,81%		0,98%	
Modelo parabólico	$i_l$	0,50%	1,30%	0,50%	1,30%
	$i_t$	1,10%	0%	1,06%	0%
	$i$	1,21%	1,30%	1,17%	1,30%
	$i_m$	1,26%		1,24%	

Para estudar a influência do parâmetro  $\delta$  segue-se o resumo dos cálculos do modelo parabólico, mas desta vez considerando  $\delta=1\%$ :

Quadro 5.2 – Inclinação média da linha de escoamento com  $\delta=1\%$ .

		2x2 vias		2x3 vias	
		Ponto A	Ponto B	Ponto A	Ponto B
Modelo parabólico	$i_l$	0,50%	1,50%	0,50%	1,50%
	$i_t$	1,33%	0%	1,25%	0%
	$i$	1,42%	1,50%	1,35%	1,50%
	$i_m$	1,46%		1,43%	

A inclinação média da linha de escoamento acima calculada,  $i_m$ , é o valor usado para o parâmetro  $p$  que faz parte das expressões em análise (3.1) e (3.2).

No Quadro 5.3 encontra-se a comparação entre as expressões de (3.1) de França e (3.2) de Gallaway para os conjuntos de  $l$  e  $p$  acima estudados, considerando constante  $ip = 10 \text{ mm/h}$  :

Quadro 5.3 – Comparação de h e V para diferentes conjuntos de l e p.

Camada de Desgaste	Caso em estudo		França 1988		Gallaway 1998	
			h [mm]	V [km/h]	h [mm]	V [km/h]
BB H/S = 0,7mm a = 3,5	2x2 l=35 m	$\varepsilon = 0,375\%$ $p = 0,81\%$	1,170	93	1,706	84
		$\delta = 0,8\%$ $p = 1,26\%$	0,873	100	1,349	90
		$\delta = 1,0\%$ $p = 1,46\%$	0,782	103	1,242	92
	2x3 l=47 m	$\varepsilon = 0,563\%$ $p = 0,98\%$	1,405	89	1,858	83
		$\delta = 0,8\%$ $p = 1,24\%$	1,226	92	1,648	85
		$\delta = 1,0\%$ $p = 1,43\%$	1,123	94	1,529	87
BBD H/S = 1,0mm a = 2,5	2x2 l=35 m	$\varepsilon = 0,375\%$ $p = 0,81\%$	1,925	82	1,516	87
		$\delta = 0,8\%$ $p = 1,26\%$	1,531	87	1,142	94
		$\delta = 1,0\%$ $p = 1,46\%$	1,411	89	1,030	96
	2x3 l=47 m	$\varepsilon = 0,563\%$ $p = 0,98\%$	2,237	79	1,674	85
		$\delta = 0,8\%$ $p = 1,24\%$	1,999	81	1,455	88
		$\delta = 1,0\%$ $p = 1,43\%$	1,863	82	1,331	90

Quando se passa de 2x2 vias para 2x3 vias, a largura de faixa aumenta, o que faz aumentar o comprimento as linhas de corrente, e apesar de no modelo linear também aumentar a inclinação, a altura de água aumenta com ambos os modelos, diminuindo a velocidade de início de hidroplanagem.

Quando se passa do modelo linear para o parabólico, a altura de água diminui e a velocidade de início da hidroplanagem aumenta. Isto deve-se ao aumento da inclinação na zona de inversão de

sobrelevação. Mas não há ganhos muito significativos, principalmente quando analisamos a expressão (3.2) de Gallaway onde temos ganhos apenas na ordem dos 4 km/h.

Era de esperar uma maior vantagem no uso do modelo parabólico, o que me leva a pensar que talvez seja demasiado simplista considerar que o comprimento da linha de escoamento não se altera quando se considera o modelo parabólico. Como a inclinação aumenta na zona de inversão de sobrelevação, a linha de escoamento já não é tão semelhante a uma semicircunferência, tomando a forma mais acentuada de uma elipse, fazendo com que  $l$  diminua. Esta alteração de  $l$  resultaria em valores mais pequenos da altura de água. Para se poder corrigir essa falha, era necessário conhecer a relação entre a inclinação da linha de escoamento e o respetivo percurso, relação essa que não é conhecida, nem faz parte do âmbito desta dissertação.

Ao aumentar  $\delta$  em 0,2%, verifica-se um decréscimo de  $h$  e um aumento de  $V$ , embora que pouco significativo, na ordem dos 2 km/h. Na realidade será uma vantagem maior, pois  $l$  diminui com o aumento da inclinação, mas esse facto não está presente nos cálculos, pela razão descrita no parágrafo acima.

# 6

## ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CONCLUSÕES

Os Gráficos 6.1 a 6.10 mostram os resultados das duas expressões ((3.1) de França e (3.2) de Gallaway) quando se faz variar um dos parâmetros, mantendo os restantes constantes. Está ainda assinalado nos gráficos entre linhas verticais o intervalo de valores razoáveis para cada parâmetro e que foi estudado ao longo deste trabalho.

O estudo foi efetuado para o BB e o BBD, considerando 2x2 vias e modelo de disfarce parabólico. Os valores considerados foram:

Para o BB:

$$H/S = 0,7 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_1 = 2,45 \text{ mm}$$

$$l = 35 \text{ m}$$

$$p = 1,46\%$$

$$ip = 15 \text{ mm/h}$$

Para o BBD:

$$H/S = 1,0 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_1 = 2,5 \text{ mm}$$

$$l = 35 \text{ m}$$

$$p = 1,46\%$$

$$ip = 15 \text{ mm/h}$$

Gráfico 6.1 – Altura de água em função da altura do ensaio de areia para o BB.

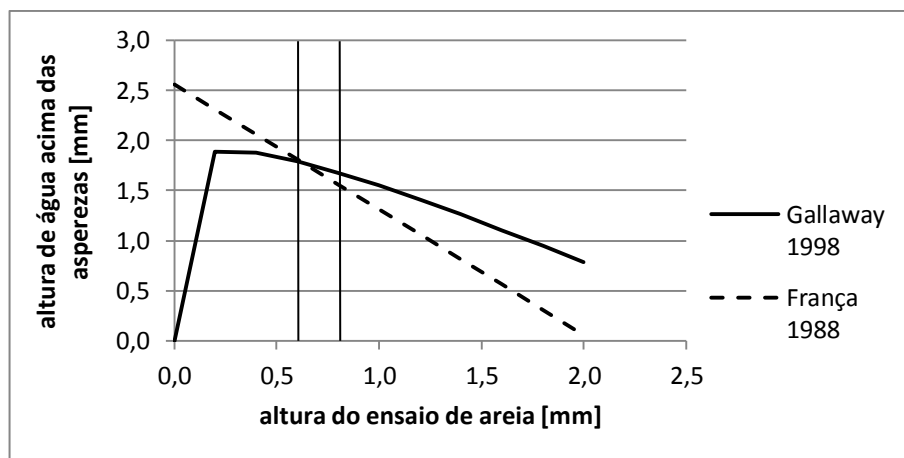


Gráfico 6.2 – Altura de água em função da altura do ensaio de areia para o BBD.

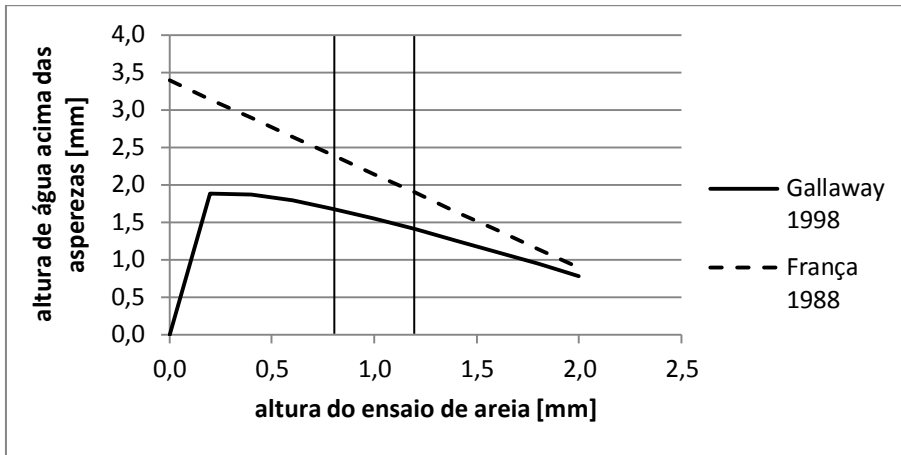


Gráfico 6.3 – Altura de água em função do coeficiente de escoamento para o BB.

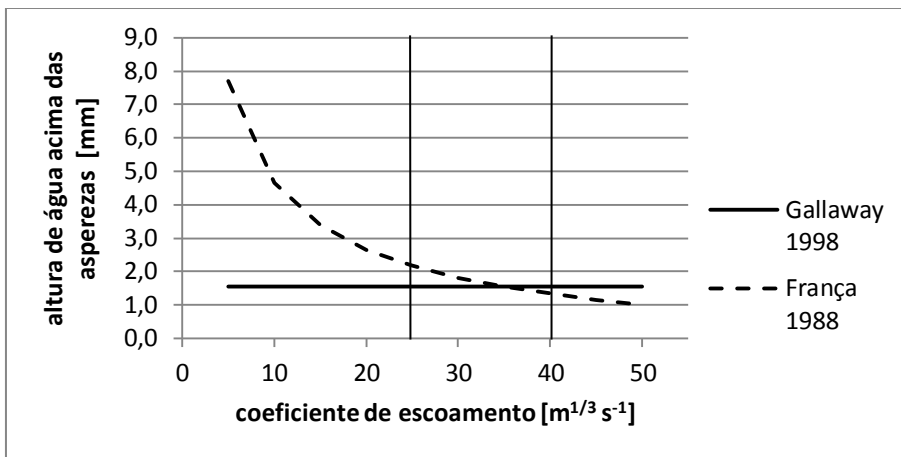


Gráfico 6.4 – Altura de água em função do coeficiente de escoamento para o BBD.

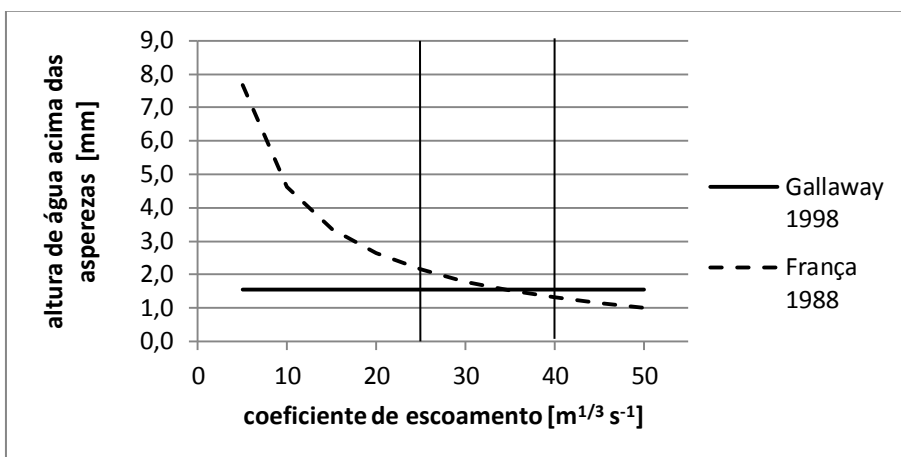


Gráfico 6.5 – Altura de água em função da intensidade de precipitação para o BB.

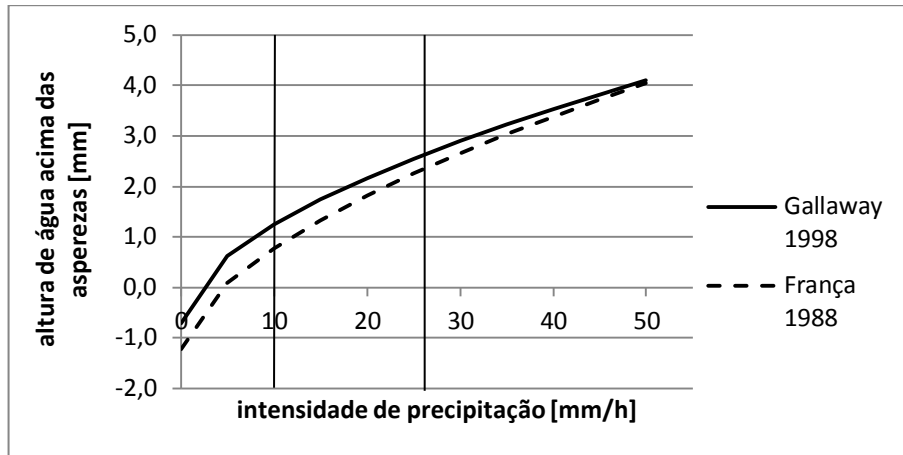


Gráfico 6.6 – Altura de água em função da intensidade de precipitação para o BBD.

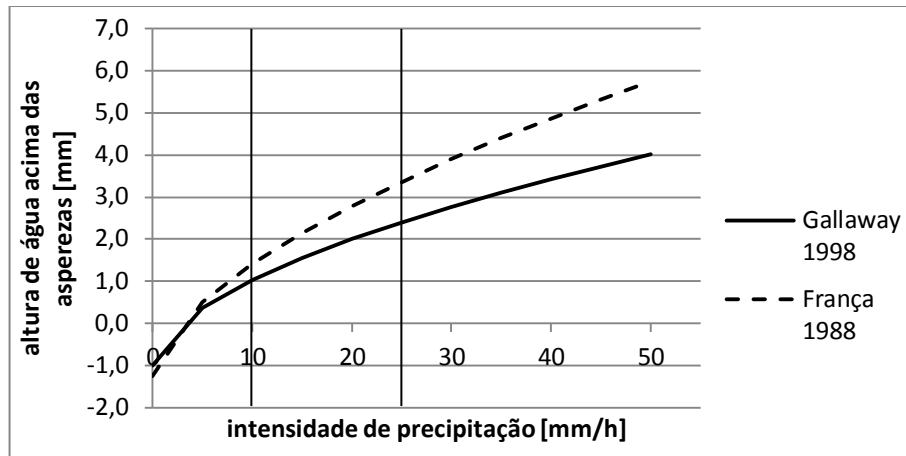


Gráfico 6.7 – Altura de água em função do comprimento das linhas de escoamento para o BB.

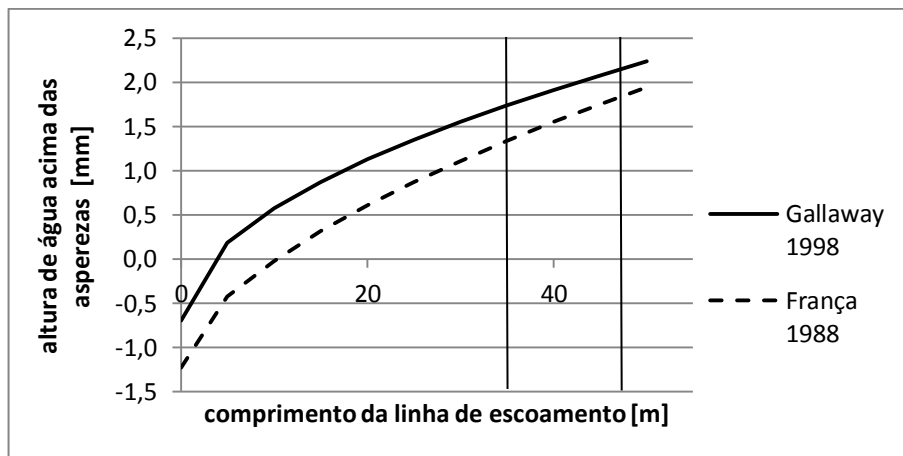


Gráfico 6.8 – Altura de água em função do comprimento das linhas de escoamento para o BBD.

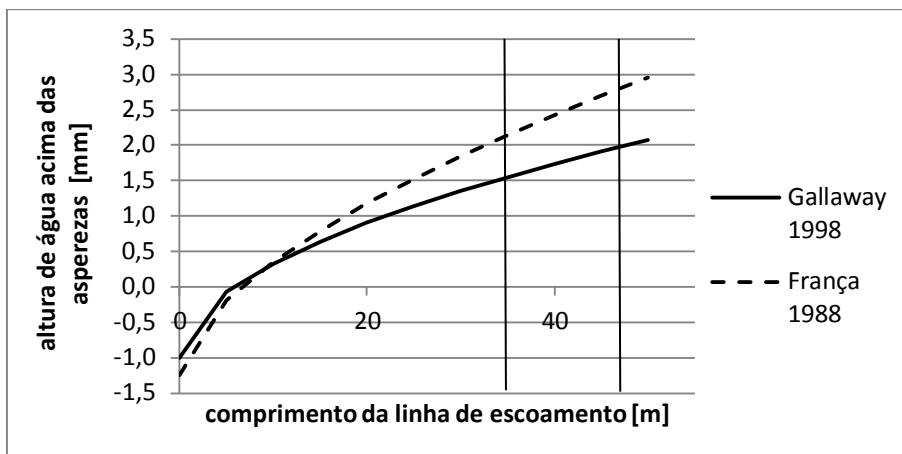


Gráfico 6.9 – Altura de água em função da inclinação das linhas de escoamento para o BB.

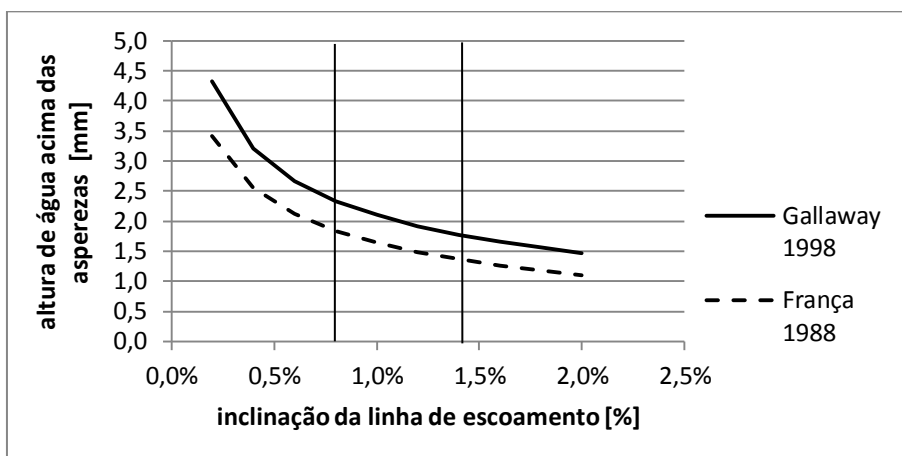
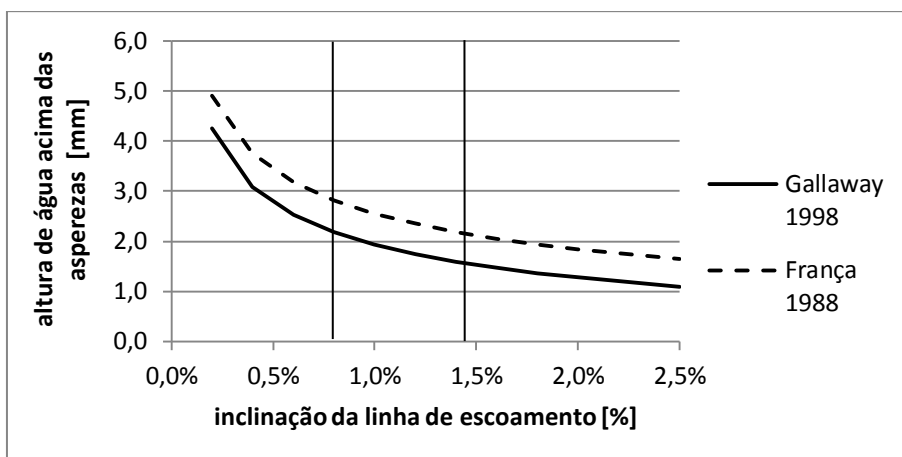


Gráfico 6.10 – Altura de água em função da inclinação das linhas de escoamento para o BBD.



A sensibilidade das expressões de Gallaway e França às suas variáveis serão de seguida analisadas.

Os valores acima considerados são os valores base, que se fazem variar em +/- 10%, 20%, 30% individualmente, enquanto se mantém os restantes parâmetros constantes.

A percentagem de alteração do valor de h para cada caso foi então calculada e é apresentada nos seguintes quadros:

Quadro 6.1 – Influência da variação de cada parâmetro em h de Gallaway para o BB.

Gallaway	-30%	-20%	-10%	10%	20%	30%
H/S [mm]	-6,0%	-4,2%	-2,2%	2,3%	4,8%	7,4%
K [ $m^{1/3}s^{-1}$ ]	0%	0%	0%	0%	0%	0%
l [m]	23,7%	15,3%	7,5%	-7,1%	-13,9%	-20,5%
p [ ]	-19,4%	-11,9%	-5,5%	4,8%	9,0%	12,8%
ip [mm/h]	25,5%	16,5%	8,1%	-7,7%	-15,1%	-22,3%

Quadro 6.2 – Influência da variação de cada parâmetro em h de Gallaway para o BBD.

Gallaway	-30%	-20%	-10%	10%	20%	30%
H/S [mm]	-12,2%	-8,4%	-4,3%	4,5%	9,1%	13,9%
K [ $m^{1/3}s^{-1}$ ]	0%	0%	0%	0%	0%	0%
l [m]	27,8%	18,0%	8,8%	-8,3%	-16,3%	-24,0%
p [ ]	-22,8%	-13,9%	-6,4%	5,6%	10,6%	15,0%
ip [mm/h]	29,9%	19,4%	9,5%	-9,1%	-17,8%	-26,1%

Quadro 6.3 – Influência da variação de cada parâmetro em h de França para o BB.

França	-30%	-20%	-10%	10%	20%	30%
H/S [mm]	-27,5%	-18,4%	-9,2%	9,2%	18,4%	27,5%
K [ $m^{1/3}s^{-1}$ ]	-45,8%	-27,5%	-12,5%	10,7%	19,9%	27,9%
l [m]	36,9%	24,0%	11,7%	-11,3%	-22,2%	-32,7%
p [ ]	-21,7%	-13,3%	-6,2%	5,4%	10,2%	14,5%
ip [m/s]	36,9%	24,0%	11,7%	-11,3%	-22,2%	-32,7%

Quadro 6.4 – Influência da variação de cada parâmetro em h de França para o BBD.

França	-30%	-20%	-10%	10%	20%	30%
H/S [mm]	-17,5%	-11,7%	-5,8%	5,8%	11,7%	17,5%
K [ $m^{1/3}s^{-1}$ ]	-37,8%	-22,7%	-10,3%	8,8%	16,4%	23,1%
l [m]	30,5%	19,8%	9,7%	-9,3%	-18,3%	-27,0%
p [ ]	-17,9%	-11,0%	-5,1%	4,5%	8,4%	12,0%
ip [mm/h]	30,5%	19,8%	9,7%	-9,3%	-18,3%	-27,0%

Nos gráficos acima apresentados pode-se concluir que França, quando comparado com Gallaway, tende a dar valores superiores de altura de água para o BBD e inferiores para o BB, devido à grande diferença do coeficiente de escoamento considerado para cada material.

É de notar que apesar das diferenças entre as duas expressões, estas apresentam valores mais semelhantes quando nos focamos no intervalo de valores estudado, que pode dizer-se que é o intervalo de valores aceitáveis para cada parâmetro.

Gallaway e França estão de acordo no seguinte: o comprimento das linhas de escoamento e a intensidade de precipitação são os parâmetros com mais influência no fenómeno da hidroplanagem. Gallaway atribui um pouco mais de importância à intensidade de precipitação, enquanto França atribui o mesmo peso a ambos os parâmetros.

Como se pode confirmar nos quadros e gráficos acima, a expressão de Gallaway não é sensível à variação do coeficiente de escoamento, já para França, este parâmetro tem uma grande importância no cálculo da altura de água, já que é o parâmetro que traduz a velocidade com que a água se escoia no pavimento.

A altura média das asperezas do pavimento, traduzida aqui por H/S, é para ambos os autores o parâmetro que menos influência tem no fenómeno da hidroplanagem. No Gráfico 6.2 pode ver-se que a expressão de Gallaway apresenta máxima altura de água para  $H/S = 0,2 \text{ mm}$ , e anula-se para  $H/S = 0 \text{ mm}$ , sendo que, teoricamente, para um pavimento liso não existiria altura de água. Esta situação não faz sentido e advém do facto de esta ser uma expressão empírica. É uma falha aparentemente sem relevância visto que os pavimentos não apresentam valores tão baixos de H/S.

É de notar ainda que, para Gallaway, o BBD é mais sensível à variação dos parâmetros, isto é, uma variação de 20% em H/S tem mais impacto no BBD do que no BB. Para França verifica-se exatamente o oposto.

A expressão de Gallaway tem sido mais utilizada, e apresenta valores mais económicos que França quando se considera o BBD, mas para o BB, Gallaway retorna valores mais conservativos.

# 7

## DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

As expressões de França e Gallaway analisadas ao longo deste trabalho são empíricas, não são matemáticas, e por isso não são exatas. A análise aqui realizada pode auxiliar futuras evoluções destas expressões.

Seria interessante que se fizesse um estudo mais preciso sobre as linhas de escoamento, para se poder determinar com mais precisão o seu comprimento e a sua inclinação, já que estes são dois parâmetros muito influentes no fenómeno da hidroplanagem.

Como os pavimentos se deterioram ao longo do tempo deveria existir uma avaliação temporal dos parâmetros que se vão alterando, sobretudo em zonas mais críticas. Isto é, fazer ensaios para determinar a macro e micro rugosidade, pois estas diminuem ao longo do tempo. Deveria determinar-se em cada momento a nova velocidade de hidroplanagem com base nos novos valores medidos, e intervir se esta diminuir consideravelmente.



## BIBLIOGRAFIA

- Anderson, D., Huebner, R., Reed, J., Warner, J., Henry, J. (1998) *Improved Surface Drainage of Pavement, Final Report*. NCHRP - National Cooperative Highway Research Program. TRB - National Research Council, Washington.
- Balkwill, K. J. (2003) *Development of a Comprehensive Method for Modeling Performance of Aircraft Tires Rolling or Breaking on Dry and Precipitation – Contaminated Runways*. Transportation Development Centre. Transport Canada.
- Branco, F., Santos, L., Pereira, P. (2006) *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, Coimbra.
- Brengarth, M., Laganier, R. (1983). *Drainoroute – Mesure du pouvoir drainant de la texture de'une surface routière*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, nº123, Jan. – Fev., p. 17-28.
- Chesterton, J., Nancekivell, N., Tunnicliffe, N. (2006) *The Use of the Gallaway Formula for Aquaplaning Evaluation in New Zealand*. Transportation and the Pursuit of Excellence, NZIHT & Transit NZ 8th Annual Conference.
- Filho, O. (2006). *Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários – Estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas*. Dissertação de Mestrado, ITA, São Paulo.
- França, A. (1988). *A Comodidade e a Segurança como critérios condicionantes da Geometria de Traçado*. Dissertação de Doutoramento, FEUP.
- França, A., Vasconcelos, A. (1991). *Disfarce da sobrelevação em Estradas com separador de largura reduzida*, Porto.
- Francisco, V. (2009). *A Drenagem Superficial e o seu Impacto Funcional e Estrutural na Vida dos Pavimentos Rodoviário*. Dissertação de mestrado, FEUP.
- Huebner, R. S., Reed, J.R, Henry J.J. (1985), *Criteria for Predicting Hydroplaning Potential*. Journal of Transportation Engineering, vol. 112 nº 5, September, p. 549-553

Lucas, J. (1969). *Rugosité Géométrique et Conditions d'Écoulement de l'Eau Sur les Chaussées*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, nº39, Jul. – Ago., p. 73-84.

Salpico, F. (2009) *Estudo de Segurança Rodoviária, O Perigo Grave de Hidroplanagem nas Estradas Portuguesas – Formulação de Cálculo e Propostas para Resolução de Problemas*. OSEC – Observatório de segurança de Estradas e Cidades, <http://www.cril-segura.com/hidroplanagem.pdf>, acedido em 12 de Abril de 2012.

Soares, A. (2011). *Análise da ocorrência de Hidroplanagem num caso real*. Dissertação de Mestrado, FCT/UNL.