



**FATEC-SP**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

**Departamento de Transporte e Obras de Terra**

**RENATA CRISTINA DA COSTA LACERDA**

**A INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA LÂMINA D'ÁGUA E DA  
VELOCIDADE CRÍTICA DE AQUAPLANAGEM EM  
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

**SÃO PAULO  
2014**

**RENATA CRISTINA DA COSTA LACERDA**

**A INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA LÂMINA D'ÁGUA E DA  
VELOCIDADE CRÍTICA DE AQUAPLANAGEM EM  
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Tecnólogo em Construção Civil na Modalidade de Movimento de Terra e Pavimentação.

Orientador: Prof. Odair de Oliveira Rosa

**SÃO PAULO  
2014**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho ao Rei dos reis, à minha família, amigos e à minha “superação pessoal”.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me sustentado até aqui e me dado força e inspiração para viver e escrever.

Agradeço aos meus pais pelo apoio na vida acadêmica, sempre acreditando em mim e me incentivando a progredir, à minha irmã pela paciência e compreensão.

Aos amigos Natália Moreno, Raquel Fernandes e Leonardo Longo pelo companheirismo e incentivo. Suas amizades foram fundamentais para que eu chegasse até aqui!

Aos professores, em especial meu orientador Prof. Odair, funcionários e demais colegas da FATEC-SP agradeço pela dedicação e empenho, que enaltecem o nome da nossa instituição e servem de exemplo a todos os alunos.

Porque não agradecer por permitir lançar-me a uma terra desconhecida e dar-lhe uma chance. Sendo agora recompensada pelas experiências de vida que obtive e pelos amigos que conquistei, agradeço mais uma vez a Deus, que desde o início tem orquestrado minha vida como uma linda sinfonia, onde notas isoladas podem não parecer tão belas, mas quando impostas em um arranjo, formam a mais linda melodia.

## **EPÍGRAFE**

“Tudo é possível se você se dedicar de  
cabeça e coração.”

Bel Pesce

## RESUMO

O trabalho expõe a problemática do acúmulo de água sobre a superfície do pavimento e compara as equações que melhor estimam a espessura da lâmina d'água e a velocidade crítica de aquaplanagem, além de relacionar essas duas grandezas à geometria da via, características dos pneus dos veículos e precipitação de chuvas. A partir da análise dessa comparação concluiu-se que todos os métodos apresentados para determinação dessas grandezas são coerentes e, portanto, são necessárias medições *in loco* para determinar qual deles apresenta resultado mais semelhante ao de uma situação real. A transmissão das informações obtidas pelos métodos, em Painéis de Mensagem Variável, pode auxiliar na manutenção da velocidade segura de tráfego em vias concessionadas, haja vista que durante uma chuva intensa a velocidade regulamentada para o local pode gerar acidentes.

Palavras-chave: Pavimento. Microtextura. Macrotextura. Aderência. Velocidade. Crítica. Lâmina. D'água.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Camadas de um pavimento flexível.....   | 3  |
| Figura 2.2 – Camadas de um pavimento rígido.....   | 4  |
| Figura 2.3 – Amostra de camada de concreto poroso.....   | 4  |
| Figura 2.4 – Pêndulo Britânico.....  | 7  |
| Figura 2.5 – Ilustração dos conceitos de micro e macrotexturas.....                                      | 8  |
| Figura 2.6 – Ensaio da Mancha de Areia.....  | 9  |
| Figura 3.1 – Ilustração, em corte, da composição estrutural de um pneu radial de veículo de passeio..... | 11 |
| Figura 4.1 – Pavimento flexível saturado e não carregado.....  | 13 |
| Figura 4.2 – Pavimento flexível saturado e carregado.....  | 14 |
| Figura 4.3 – Pavimento rígido saturado e não carregado.....  | 15 |
| Figura 4.4 – Pavimento rígido saturado e carregado na placa anterior.....                                | 15 |
| Figura 4.5 – Pavimento rígido saturado e carregado na placa posterior.....                               | 15 |
| Figura 4.6 – Pavimento poroso.....   | 16 |
| Figura 4.7 – Meios de infiltração da água no pavimento.....  | 17 |
| Figura 4.8 – Altura de água acima da macrotextura.....   | 18 |
| Figura 4.9 – Comprimentos diversos das linhas de água sobre o pavimento.....                             | 19 |
| Figura 5.1 – Vista lateral de um pneu rolando sobre um pavimento com lâmina d'água.....                  | 21 |
| Figura 5.2 – Variação da área de contato pneu-pavimento.....   | 22 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Classificação da textura na superfície do pavimento.....  | 5  |
| Tabela 2.2 – Influência das texturas em diversos aspectos.....   | 5  |
| Tabela 2.3 – Influência do comprimento de onda da textura, em metros, em diversos aspectos da superfície do pavimento..... | 6  |
| Tabela 2.4 – Classes de Resistência à derrapagem pelo método do Pêndulo Britânico.....                                     | 7  |
| Tabela 2.5 – Avaliação da macrotextura pelo método da Mancha de Areia.....   | 9  |
| Tabela 2.6 – Tipos de superfícies possíveis em função da micro e macrotextura.....   | 10 |
| Tabela 6.1 – Viscosidade cinemática da água em condições normais de pressão e com variação de temperatura.....             | 25 |
| Tabela 8.1 – Valores de velocidade crítica de aquaplanagem correspondentes às espessuras de lâmina d'água.....             | 31 |



## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Objetivo .....   | 2         |
| 1.2      | Justificativa.....   | 2         |
| 1.3      | Metodologia .....  | 2         |
| <b>2</b> | <b>PAVIMENTO .....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1      | Conceito .....   | 3         |
| 2.2      | Pavimento Flexível.....  | 3         |
| 2.3      | Pavimento Rígido.....  | 3         |
| 2.4      | Pavimento Permeável ou Poroso .....                                | 4         |
| 2.5      | Textura Superficial .....  | 5         |
| 2.5.1    | Microtextura.....  | 6         |
| 2.5.1.1  | Pêndulo Britânico .....  | 6         |
| 2.5.2    | Macrotextura .....   | 7         |
| 2.5.2.1  | Mancha de Areia.....   | 8         |
| 2.5.3    | Tipos de Superfície .....  | 9         |
| <b>3</b> | <b>PNEU .....</b>  | <b>11</b> |
| 3.1      | Definição .....  | 11        |
| 3.2      | Composição.....  | 11        |
| 3.3      | Banda de Rodagem e Pressão de Enchimento dos pneus .....           | 12        |
| 3.4      | Ranhuradas .....   | 12        |
| <b>4</b> | <b>EFEITOS DA PRESENÇA DE ÁGUA NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO .....</b> | <b>13</b> |
| 4.1      | Pavimento Flexível.....  | 13        |
| 4.2      | Pavimento Rígido.....  | 14        |
| 4.3      | Pavimento Poroso .....   | 16        |
| 4.4      | Infiltração .....  | 16        |
| 4.5      | Permeabilidade em Pavimentos.....                                  | 17        |
| 4.6      | Sistemas de Drenagem.....  | 17        |
| 4.7      | Lâmina D'água.....   | 18        |
| <b>5</b> | <b>ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO.....</b>                               | <b>20</b> |
| 5.1      | Coefficiente de Atrito .....                                       | 20        |
| 5.2      | Aquaplanagem Dinâmica .....  | 20        |
| 5.3      | Viscoplanagem .....  | 21        |
| 5.4      | Velocidade Crítica de Hidroplanagem.....                           | 22        |
| <b>6</b> | <b>ESTUDO DA ESPESSURA DA LÂMINA D'ÁGUA .....</b>                  | <b>23</b> |
| 6.1      | Gallaway (1979).....   | 23        |
| 6.2      | PAVDNR (1988).....   | 23        |
| 6.3      | Anderson (1998).....   | 24        |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 6.4 | Prado e Palma (2012).....  | 25 |
| 7   | <b><i>ESTUDO DA VELOCIDADE CRÍTICA DE AQUAPLANAGEM</i></b> ..... | 27 |
| 7.1 | Método de Gallaway .....   | 27 |
| 7.2 | Método de França (1988) .....                                    | 27 |
| 7.3 | Método de Agrawall e Henry .....                                 | 28 |
| 8   | <b><i>COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS</i></b> .....                       | 29 |
| 9   | <b><i>CONCLUSÃO</i></b> .....                                    | 32 |
|     | <b><i>REFERÊNCIAS</i></b> .....                                  | 33 |

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da frota de veículos no país tem chamado a atenção do poder público e da sociedade em geral, pela influência na segurança e na economia. O crescimento é significativo nas metrópoles brasileiras, segundo um estudo do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Observatório das Metrópoles, entre 2001 e 2011, o crescimento da frota de automóveis chegou a 77,8% e o de motocicletas 289,4%.

O aumento da frota demanda maior utilização das vias e em consequência a manutenção da infraestrutura rodoviária, para atender com qualidade a essa frota, é preciso mais investimento. Para atender minimamente às condições de segurança a pista deve atender os requisitos de projeto geométrico, do sistema de drenagem, das sinalizações vertical e horizontal, da manutenção periódica, garantir a qualidade dos materiais utilizados na sua construção e respeitar o ambiente.

Apesar da importância dos controles de execução que se deve proceder, existem situações que fogem aos controles de projeto e fiscalização, tais como as obras de drenagem que antecedem e chuvas extemporâneas que extrapolam a recorrência considerada em projeto.

A chuva, o mais devastador dentre aqueles que podem gerar o desgaste da via, ocasiona a formação de patologias diversas e provoca o desmoronamento dos taludes adjacentes. Outro problema que pode ser gerado pelo excesso de chuvas, é o acúmulo de águas na pista em pontos de baixa diferença de nível (regiões planas), o grande causador do fenômeno conhecido como aquaplanagem.

Observa-se no Brasil, por ser um país com clima predominantemente tropical, um grande índice de chuvas torrenciais, assim como a existência de fenômenos naturais que não podem ser previstos. Dentre outros fatores a aquaplanagem pode também ser evitada com a diminuição da velocidade de rodagem do veículo, o que pode ocasionar a mudança da velocidade de projeto em determinados trechos da via.

Segundo um relatório de 2011 da Companhia de Engenharia de Tráfego - CET do município de São Paulo, após uma observação no período de dois anos no bairro da Moóca, os dados registraram que em dias de chuva o número de acidentes de trânsito é duas vezes maior.

## **1.1 OBJETIVO**

O trabalho visa expor e comparar as equações que melhor estimem a espessura da lâmina d'água e a velocidade crítica de aquaplanagem, associadamente à geometria da via, às características dos pneus dos veículos e à precipitação média de chuvas locais.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Este estudo vem auxiliar na prevenção da ocorrência do fenômeno da aquaplanagem, em vista do grande número de acidentes e incidentes gerados nas rodovias brasileiras devido às velocidades incompatíveis para tráfego em vias molhadas.

## **1.3 METODOLOGIA**

A fim de alcançar o objetivo desejado, foram estudadas diversas equações, elaboradas ao longo dos anos, que já são consagradamente utilizadas na determinação da espessura da lâmina d'água e da velocidade crítica de aquaplanagem, para observar, entre elas, as que apresentam resultados mais próximos da realidade nas rodovias.

## 2 PAVIMENTO

### 2.1 CONCEITO

O pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplenagem, que tem como objetivo resistir aos esforços provenientes dos veículos que trafegam sobre a via e distribuir, os mesmos, ao subleito e proporcionar melhores condições de conforto e segurança. (DNER, 1997, p. 194)

### 2.2 PAVIMENTO FLEXÍVEL

A descrição de pavimento flexível contida no Glossário de Termos Técnicos e Rodoviários relata que “consiste de uma camada de rolamento asfáltica e de base, constituída de uma ou mais camadas, que se apoia sobre o leito da estrada, sendo que a camada de rolamento pode-se adaptar à deformação da base, quando solicitada”. (DNER, 1997, p. 194)

Como ilustrado na Figura 2.1, apresentada abaixo, “são compostos por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 337)

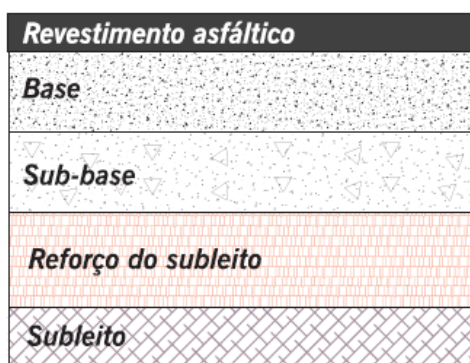


Figura 2.1 – Camadas de um pavimento flexível

Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

### 2.3 PAVIMENTO RÍGIDO

Segundo Bernucci *et al.* (2008, p. 337) pavimentos rígidos “são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (em geral placas, armadas ou não), apoiada geralmente sobre uma camada de material granular ou de material

estabilizado com cimento (chamada sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito quando necessário”.

Pela descrição de Pinto (2003, p. 26), a diferenciação entre o pavimento rígido e o flexível se dá em que, naquele ao invés das camadas de revestimento e base há uma laje (placa), a qual possui alta resistência à flexão. A Figura 2.2 apresenta o esquema dessa estrutura.

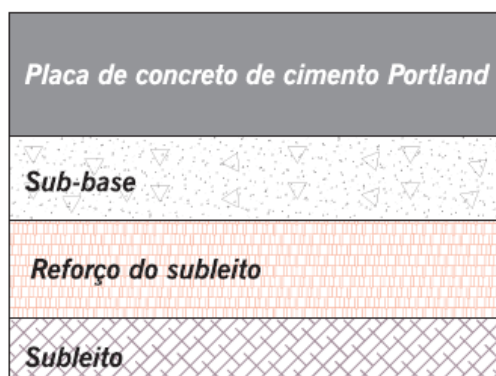


Figura 2.2 – Camadas de um pavimento rígido

Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

## 2.4 PAVIMENTO PERMEÁVEL OU POROSO

Tomaz (2009) diz que o pavimento poroso “permite que as águas pluviais que caem sobre o pavimento percolem no solo abaixo. O pavimento poroso consiste de um pavimento de asfalto ou concreto onde não existem os agregados finos”. Ratificando o que foi dito por Tomaz e ilustrado na Figura 2.3, Ferguson declara que os “pavimentos permeáveis são definidos como aqueles que possuem espaços livres na sua estrutura por onde a água pode atravessar”. (FERGUSON, 2005 *apud* ABESC, 2013)



Figura 2.3 – Amostra de camada de concreto poroso

Fonte: SUPERMIX [2010]

## 2.5 TEXTURA SUPERFICIAL

Segundo a *American Society of Testing* (ASTM) a textura é “o conjunto de características associadas à capacidade do pavimento em atender ao tráfego dos veículos que demandam sua utilização de forma segura, suave, confortável e econômica”. (ASTM *apud* RODRIGUES FILHO, 2006, p. 96)

A textura é classificada como: microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade, as quais têm suas dimensões apresentadas na Tabela 2.1. Dentre elas, apenas a macro e a microtextura serão relevantes para este trabalho, devido seus campos de influência, que podem ser observados nas Tabelas 2.2 e 2.3.

Tabela 2.1 – Classificação da textura na superfície do pavimento

| Escala         | Intervalo de dimensões |             |
|----------------|------------------------|-------------|
|                | Horizontal             | Vertical    |
| Microtextura   | 0 – 0,5 mm             | 0 – 0,2 mm  |
| Macrotextura   | 0,5 – 50 mm            | 0,2 – 10 mm |
| Megatextura    | 5 – 50 cm              | 1 – 50 mm   |
| Irregularidade | 0,5 – 50 m             | 1 – 1200 mm |

Fonte: MATTOS (2009, p. 38)

Tabela 2.2 – Influência das texturas em diversos aspectos

| Efeitos no Veículo, Ocupantes ou Meio Ambiente | Características da Superfície | Influência |
|--|-------------------------------|------------|
| Atrito   | Microtextura                  | Muito Alta |
|  | Macrotextura                  | Alta       |
|  | Megatextura                   | Moderada   |
| Resistência ao Rolamento                       | Macrotextura                  | Alta       |
| Consumo de Combustível                         | Megatextura                   | Muito Alta |
| Poluição do Ar                                 | Irregularidade                | Alta       |
| Desgaste do Pneu                               | Microtextura                  | Muito Alta |
|  | Macrotextura                  | Moderada   |
| Ruído Externo                                  | Macrotextura                  | Muito Alta |
|  | Megatextura                   | Muito Alta |
| Drenagem da Superfície                         | Macrotextura                  | Alta       |

|                         |              |                 |
|-------------------------|--------------|-----------------|
| Esguicho e Pulverização | Macrotextura | Alta            |
| Reflexão (luz de farol) | Microtextura | Pouco Conhecida |
|                         | Macrotextura | Alta            |

Fonte: NOYCE *et al.* (2005) *apud* RODRIGUES FILHO (2006, p. 99)

Tabela 2.3 – Influência do comprimento de onda da textura, em metros, em diversos aspectos

| $10^{-6}$               | $10^{-5}$ | $10^{-4}$ | $10^{-3}$                | $10^{-2}$ | $10^{-1}$   | $10^0$         | $10^1$ |
|-------------------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|-------------|----------------|--------|
| Microtextura            |           |           | Macrotextura             |           | Megatextura | Irregularidade |        |
| Atrito em pista molhada |           |           |                          |           |             |                |        |
|                         |           |           | Ruído Ext.               |           |             |                |        |
|                         |           |           | Ruído Interno            |           |             |                |        |
|                         |           |           | Esguicho e Spray         |           |             |                |        |
|                         |           |           | Resistência ao rolamento |           |             |                |        |
| Desgaste do Pneu        |           |           |                          |           |             | Danos ao Pneu  |        |

Fonte: 18º WORLD ROAD CONGRESS *apud* NOYCE (2005) *apud* RODRIGUES FILHO (2006, p. 99)

### 2.5.1 Microtextura

Comumente denominada de atrito, Mattos (2009, p. 38) descreve que “a microtextura da superfície do pavimento depende da aspereza dos agregados utilizados na mistura asfáltica do revestimento”. Já a aspereza depende da composição mineralógica e da forma dos agregados, como a existência de arestas vivas na sua superfície.

Para a medição deste índice na camada de rolamento, utilizam-se alguns equipamentos, tais como: Pêndulo Britânico,  $\mu$ -meter e Grip-tester.

#### 2.5.1.1 Pêndulo Britânico

Esse é o ensaio mais difundido para a determinação da microtextura do pavimento, devido a rapidez e facilidade que oferece. O equipamento consiste de um tripé horizontal de apoio e nivelamento, uma coluna de suporte para o pêndulo e um quadrante de escala de medida, ilustrados na Figura 2.4. A medida se dá pela perda de energia do pêndulo de base emborrachada que atrita com a superfície do pavimento molhado (simulação da passagem de um pneu sobre um pavimento molhado) e registra



um valor de resistência à derrapagem no quadrante, o qual é expresso em BPN (British Pendulum Number) ou VRD (Valor de Resistência à Derrapagem), em português. (MATTOS, 2009, p. 51 e 52)



Figura 2.4 – Pêndulo Britânico

Fonte: NÉSTOR HUAMÁN E ASOCIADOS [2014]

A classificação da microtextura em função do BPN é apresentada na Tabela 2.4, conforme especificado no Manual de Recuperação de pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), o qual sugere valor de  $BPN \geq 55$ , superfície rugosa a muito rugosa.

Tabela 2.4 – Classes de Resistência à derrapagem pelo método do Pêndulo Britânico

| Classificação            | Limites de BPN |
|--------------------------|----------------|
| Perigosa                 | < 25           |
| Muito Lisa               | 25 – 31        |
| Lisa                     | 32 – 39        |
| Insuficientemente Rugosa | 40 – 46        |
| Mediamente Rugosa        | 47 – 54        |
| Rugosa                   | 55 - 75        |
| Muito Rugosa             | > 75           |

Fonte: MATTOS (2009) *apud* DNIT (2006)

### 2.5.2 Macrotextura

Para Rodrigues Filho (2006, p. 96) “a macrotextura é caracterizada pelo tamanho do agregado, pela faixa granulométrica [...], pela configuração geométrica individual do agregado e pelos vazios existentes na mistura” e Mattos (2009, p. 39)

complementa ao dizer que ela é a responsável pela aderência entre o pneu e o pavimento nas faixas de velocidade médias ou altas e por facilitar o escoamento de águas superficiais, evitando dessa forma a derrapagem do veículo. A Figura 2.5 apresenta a representação da macrotextura e da microtextura, que será abordada adiante.

Para a mensuração deste índice, utilizam-se os ensaios de: Mancha de Areia, Perfilômetro Laser e drenabilidade.

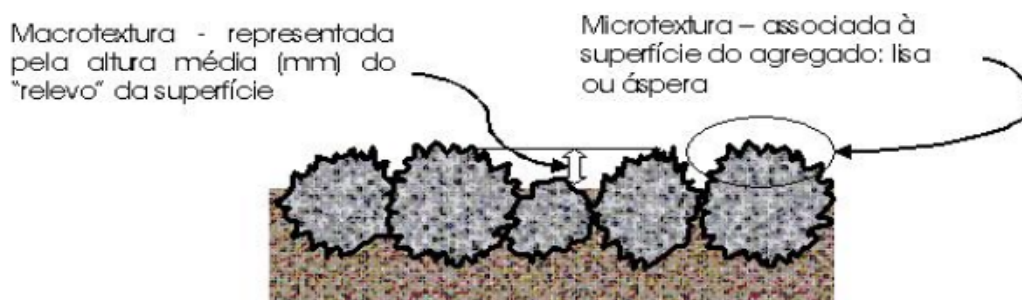


Figura 2.5 – Ilustração dos conceitos de micro e macrotexturas

Fonte: RODRIGUES FILHO (2006)

### 2.5.2.1 Mancha de Areia

Esse ensaio é extremamente simples, porém dificilmente correlacionável com outros métodos. Os equipamentos consistem de uma escova para limpeza da superfície a ser ensaiada, um volume de 25.000mm<sup>3</sup> de um material granular de peso aparente e granulometria conhecidos e um disco emborrachado de 64mm de diâmetro para o espalhamento do material granular sobre a superfície do pavimento. O espalhamento de todo o volume de areia (V) deve ser feito em uma área aproximadamente circular, para então proceder-se a aferição do diâmetro médio (D), em milímetros, o qual consiste da média aritmética de quatro aferições, defasadas de 45° uma da outra, o que culmina no resultado apresentado na Figura 2.6. Dessa forma, obtém-se a altura média da mancha de areia (HS), através da equação  $HS = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2}$ . (MATTOS, 2009, p. 54 a 59)



Figura 2.6 – Ensaio da Mancha de Areia

Fonte: MATTOS (2009)

A classificação da macrotextura em função da HS (altura de areia) é apresentada na Tabela 2.5, conforme especificado no Manual de Recuperação de pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), o qual sugere valor de  $0,6\text{mm} < \text{HS} < 1,2\text{mm}$ , superfície média a grossa.

Tabela 2.5 – Avaliação da macrotextura pelo método da Mancha de Areia

| Classificação | Limites de HS |
|---------------|---------------|
| Muito Fina    | $< 0,20$      |
| Fina          | $0,21 - 0,40$ |
| Média         | $0,41 - 0,80$ |
| Grossa        | $0,81 - 1,20$ |
| Muito Grossa  | $> 1,20$      |

Fonte: MATTOS (2009) *apud* DNIT (2006)



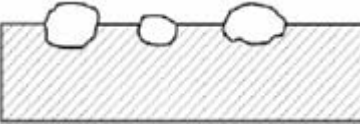

### 2.5.3 Tipos de Superfície

A superfície do pavimento pode ser classificada pela microtextura e macrotextura, conforme apresenta a Tabela 2.6 e é descrita por Mattos (2009, p. 40) da seguinte forma:

“[...] em termos de microtextura pode ser classificada por rugosa ou polida, sendo rugosa quando apresenta arestas vivas e polida quando a superfície é lisa. Quanto à macrotextura, a superfície

pode ser classificada por aberta ou fechada, sendo denominada aberta quando apresenta agregados graúdos e fechada quando possui elevada quantidade de finos.”

Tabela 2.6 – Tipos de superfícies possíveis em função da micro e macrotextura

| Microtextura          | Macrotextura | Superfície   | Tipo de Textura  |
|-----------------------|--------------|--|------------------|
| <b>Rugosa</b>         | Aberta       |  | Rugosa e Aberta  |
|                       | Fechada      |  | Rugosa e Fechada |
| <b>Polida ou Lisa</b> | Aberta       |  | Polida e Aberta  |
|                       | Fechada      |  | Polida e Fechada |

Fonte: APS (2006) *apud* MATTOS (2009, p. 40)

### 3 PNEU

#### 3.1 DEFINIÇÃO

Abreviação de pneumático, segundo o Boletim de Orientação Técnica da Goodyear (2010, p. 22) “define-se mecanicamente o pneu como um recipiente de pressão e único ponto de apoio do veículo à superfície da estrada”.

Sua finalidade é “suportar a capacidade de carga para a qual foi fabricado, oferecer desempenho eficiente ao conjunto de freio e oferecer uma boa dirigibilidade de acordo com as normas técnicas do produto”. (SCAGLIUSI, 2010, p. 5)

#### 3.2 COMPOSIÇÃO

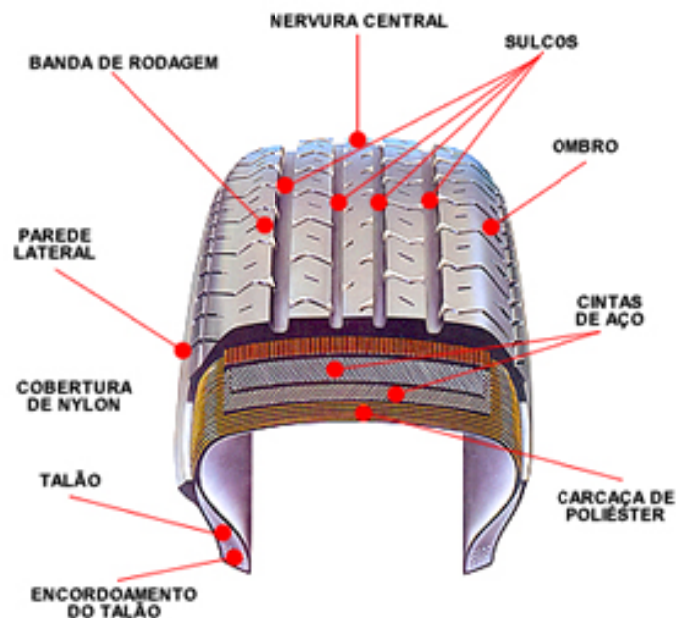


Figura 3.1 – Ilustração da composição estrutural de um pneu radial de veículo de passeio

Fonte: XANCAR PNEUS [2011]

Observando-se as teses de Scagliusi (2010, p. 5) e Soares; (2011, p. 16) podemos definir cada um dos componentes do pneumático, que foram apresentados na Figura 3.1, como:

a) Banda de rodagem: produzida por um composto de borracha bastante resistente ao desgaste, é a parte externa que faz o contato com a pista, tendo seu desenho

projetado especificamente para auxiliar e melhorar a tração, a estabilidade e a segurança durante sua utilização;

b) Cintas de aço: feixe de cintas que tem como função dar estabilidade à carcaça do pneu, garantindo a área e contato mínimo entre o mesmo e o solo;

c) Talão: constituído internamente por arames de aço de alta resistência na forma de um anel, tem como função manter o pneu fixo ao aro da roda, não permitindo vazamentos de ar;

d) Carcaça de lona: é a câmara interna do pneu, que retém o ar sob pressão. Deve ser bastante resistente, pois suporta o peso total do veículo, a pressão e os choques. Geralmente é composta por lona de poliéster, nylon ou aço;

e) Parede lateral ou Flanco: têm como função proteger a carcaça, para isso é composto por borrachas de alto grau de flexibilidade;

f) Nervura central: tem como função proporcionar o contato circunferencial do pneu com o solo ou pavimento;

g) Ombro: tem como função apoiar o pneu para as manobras;

h) Sulcos ou Ranhuras: tem como função escoar a água que possa estar na superfície de contato com o pavimento.

### **3.3 BANDA DE RODAGEM E PRESSÃO DE ENCHIMENTO DOS PNEUS**

Pela descrição de Rodrigues Filho (2006), ao se aumentar a pressão de enchimento dos pneus, maior é a resistência da banda de rodagem, ou seja, ela irá se deformar menos pela ação da força hidrodinâmica, logo a extensão onde a água penetra diminui.

### **3.4 RANHURAS**

As ranhuras são citadas por Ludwig (2012) como raiaas contínuas ao longo do perímetro que permitem a passagem da água que está na superfície de contato. Conclui-se que a espessura de lâmina d'água para provocar a aquaplanagem deve ser maior quanto mais profundas forem as ranhuras.

## 4 EFEITOS DA PRESENÇA DE ÁGUA NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO

Conforme descrito por Suzuki, Azevedo e Junior (2013, p. 26), para o cálculo das estruturas de pavimentos são utilizados ensaios com amostras de solo saturadas, a fim de determinar sua resistência nessa condição extrema.

Esses ensaios não consideram a precipitação das chuvas e o consequente dano que pode ser gerado na estrutura do pavimento.

Segundo os mesmos autores, verifica-se que “os mais sérios danos causados ao pavimento devem-se às poro pressões e à movimentação da água livre no interior de sua estrutura”.

Assim, entender e considerar a ação da água livre na estrutura do pavimento é fundamental, ainda que não seja este o foco do trabalho.

### 4.1 PAVIMENTO FLEXÍVEL

A ação da carga de tráfego no pavimento flexível gera uma elevada pressão hidrostática no interior da sua estrutura (poro pressão), provocando movimentação das partículas de solo que estão na interface das camadas para as juntas ou trincas, gerando vazios na seção do pavimento (bombeamento). Essa ação provoca a diminuição da capacidade de suporte, o aparecimento de novas trincas, e a desagregação do solo. (SUZUKI; AZEVEDO; JUNIOR, 2013, p. 28 e 29) Todo o processo descrito está ilustrado nas Figuras 4.1 e 4.2.



Figura 4.1 – Pavimento flexível saturado e não carregado

Fonte: AZEVEDO (2007)

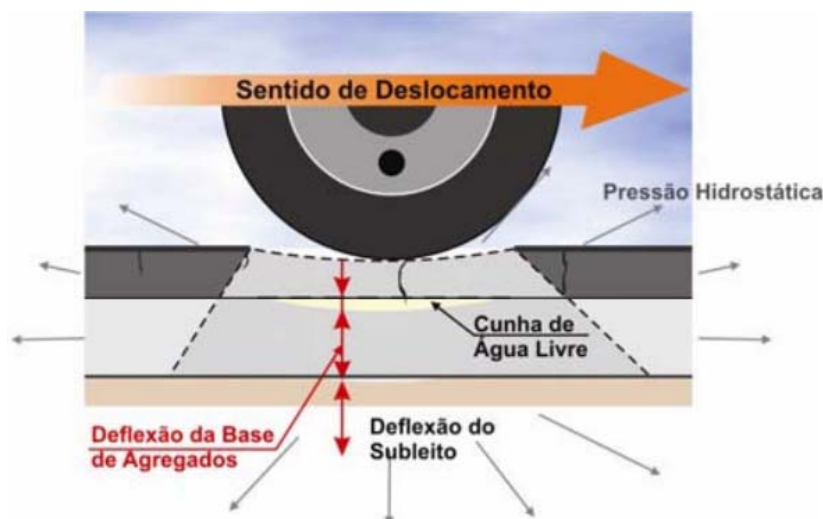


Figura 4.2 – Pavimento flexível saturado e carregado

Fonte: AZEVEDO (2007)

## 4.2 PAVIMENTO RÍGIDO

No pavimento com revestimento de Concreto de Cimento Portland (Figura 4.3) ocorre o bombeamento dos finos para as bordas, trincas ou juntas, devido o empenamento das placas. Isso não ocorre se existirem barras de transferência de carga.

O fenômeno do empenamento é gerado pela diferença de umidade entre as faces superior e inferior da placa provocando tensões de tração em uma face e compressão na outra, com isso a placa fica em contato com a sub-base apenas na região central, enquanto que nas bordas a água livre se armazena. Quando da passagem do tráfego a água que está sob a borda da placa é induzida com forte pressão à placa seguinte (Figura 4.4). Quando a roda ultrapassa a junta, a placa anterior retorna a posição original e a borda da seguinte abaixa (Figura 4.5), gerando o bombeamento dos finos e podendo causar erosão do subleito e trincas de canto na placa. (SUZUKI; AZEVEDO; JUNIOR, 2013, p. 29 e 30)





Figura 4.3 – Pavimento rígido saturado e não carregado  
Fonte: AZEVEDO (2007)

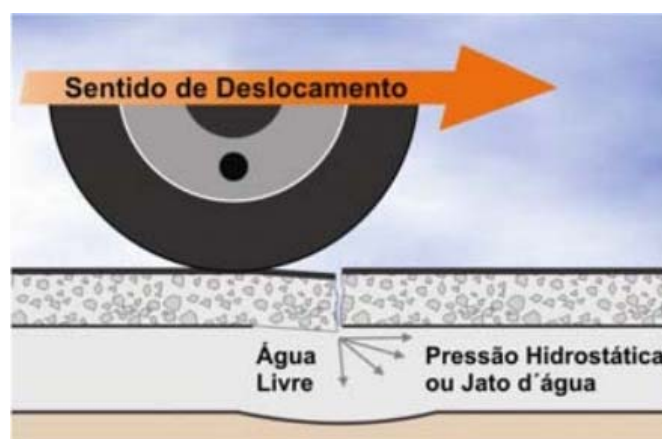


Figura 4.4 – Pavimento rígido saturado e carregado na placa anterior  
Fonte: AZEVEDO (2007)



Figura 4.5 – Pavimento rígido saturado e carregado na placa seguinte  
Fonte: AZEVEDO (2007)

### 4.3 PAVIMENTO POROSO

O objetivo dos pavimentos porosos é permitir a máxima percolação de água, sua infiltração no solo ou armazenamento e posterior condução das mesmas para fora da estrutura do pavimento, como pode ser observado na Figura 4.6. (SUZUKI; AZEVEDO; JUNIOR, 2013, p. 180 e 181)

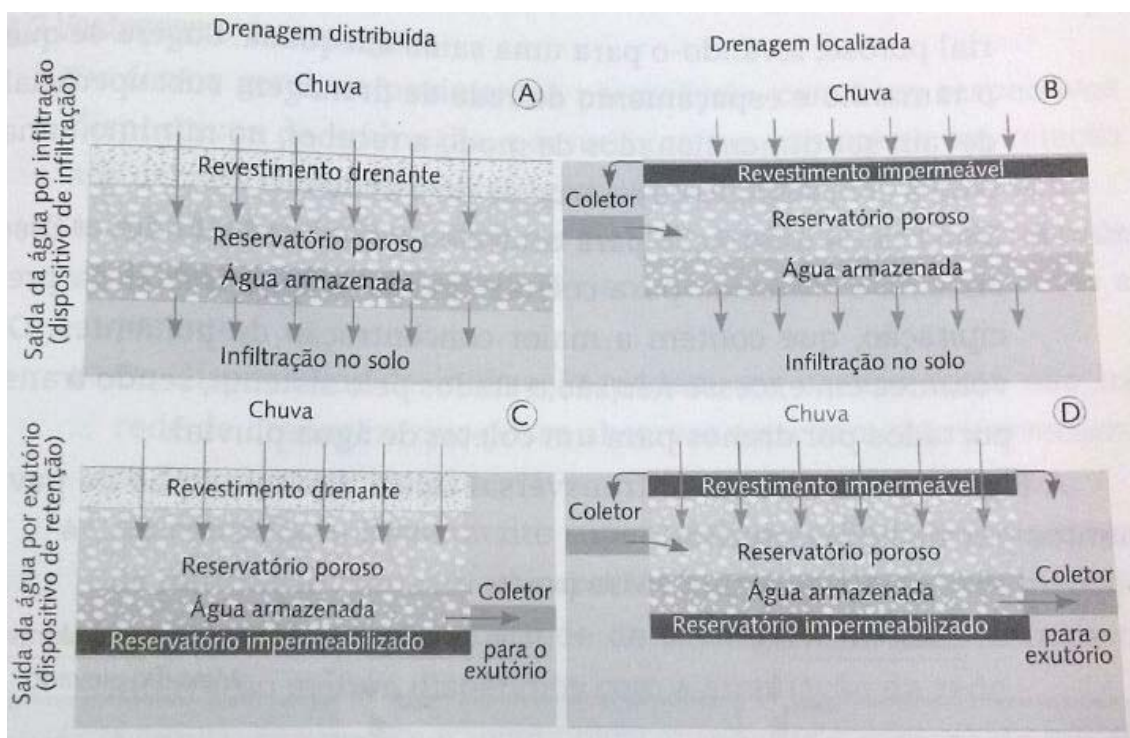


Figura 4.6 –Pavimento poroso

Fonte: SUZUKI; AZEVEDO; JUNIOR, (2013)

### 4.4 INFILTRAÇÃO

Pereira (2003) e Azevedo (2007) afirmam que o pavimento possui uma grande área de superfície exposta à infiltração, a qual pode atingi-lo por diversas fontes (Figura 4.7). Pode haver a infiltração através da superfície, por juntas ou trincas no revestimento, infiltração lateral, devido às águas acumuladas nos acostamentos ou canteiros não impermeabilizados, infiltração por fluxos ascendentes de lençol freático, infiltração por capilaridade e por condensação de vapor de água, devido às diferenças de temperatura e à pressão atmosférica.

No entanto esta última forma pode ser desprezada, devido sua insignificância quando comparada às outras. As demais fontes permitem a entrada da

água na estrutura do pavimento em volume suficiente para alterar o teor de umidade. Essa quantidade de água possui movimentação livre, de acordo com as leis da hidráulica e é um dos principais agentes deterioradores do pavimento.

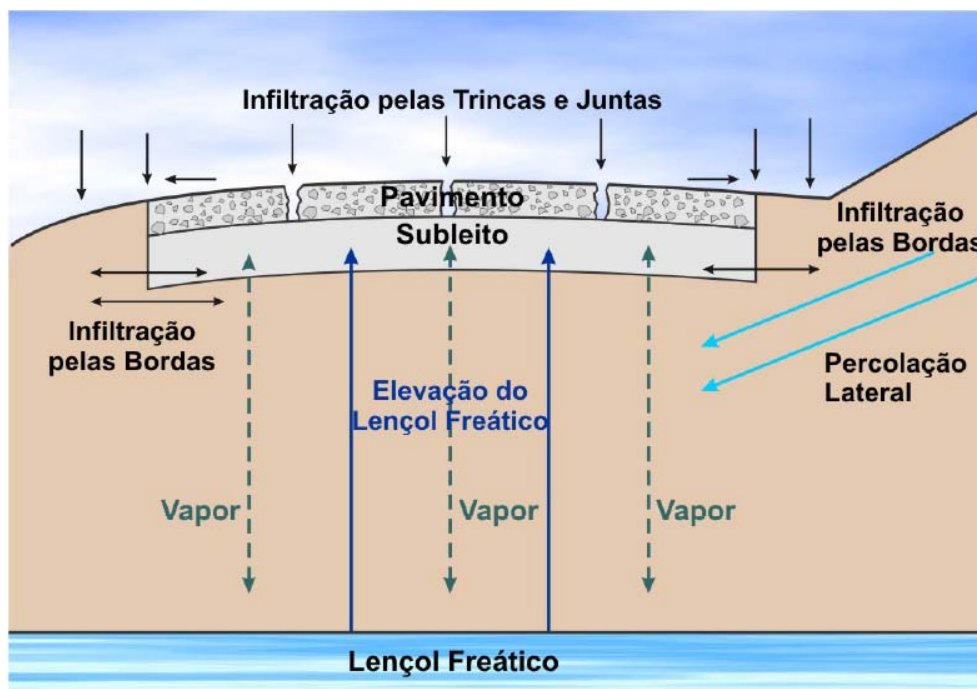


Figura 4.7 – Meios de infiltração da água no pavimento

Fonte: AZEVEDO (2007)

#### 4.5 PERMEABILIDADE EM PAVIMENTOS

“Propriedade dos materiais de pavimentação e solos que indica a maior ou menor facilidade que os mesmos oferecem à passagem da água através de seus vazios”. É expressa pelo Coeficiente de Permeabilidade ( $k$ ). (AZEVEDO, 2007, p. 48)

Para Gayer “a água leva um tempo para escoar. Este tempo tem que ser compatível com a vazão, volume dos vazios, e pressão a que está submetida”.

#### 4.6 SISTEMAS DE DRENAGEM

Para Almeida (2007) os sistemas de drenagem evitam o acúmulo e a retenção de água na rodovia, as construções para esse fim são denominadas de dispositivos de drenagem, são eles:

- Dispositivos de drenagem superficial: valetas de proteção de corte, valetas de proteção de aterro, sarjetas de corte, sarjetas de aterro, saídas e descidas

d'água, caixas coletoras, bueiros de greide, dissipadores. Tem a função de drenar as águas precipitadas sobre a estrada e áreas adjacentes.

- Dispositivos de drenagem do pavimento: camada drenante do pavimento, drenos laterais de base (sangras), drenos rasos longitudinais, drenos transversais de pavimento. Tem a função de retirar as águas infiltradas nas camadas do pavimento.
- Dispositivos de drenagem subterrânea ou profunda: drenos profundos, drenos em espinha-de-peixe, camadas drenantes, drenos horizontais profundos, valetões laterais. Tem a função de drenar a água situada abaixo da superfície do terreno natural.
- Dispositivos de transposição de talwegues: bueiros, pontilhões e pontes. Tem a função de possibilitar a passagem da água de um para outro lado da estrada.

#### 4.7 LÂMINA D'ÁGUA

É um “corpo d'água com espessura relativamente pequena em relação à sua extensão horizontal”. Na prática ela representa a faixa de água acima da macrotextura do pavimento (Figura 4.8), aquela que não pode ser escoada devido à deficiência no sistema de drenagem ou à intensa precipitação pluviométrica. (DNER, 1997, p. 142)

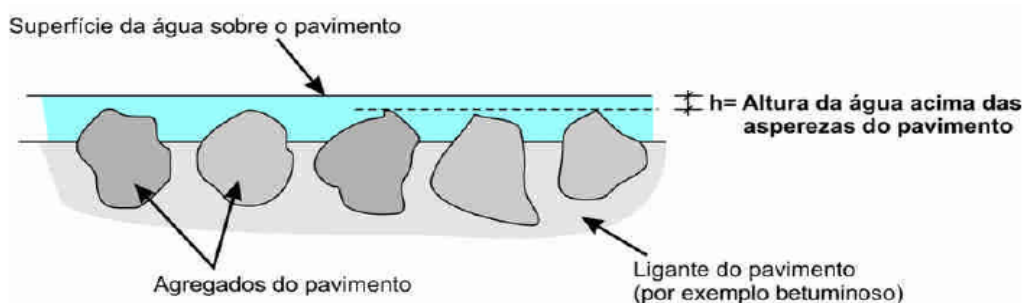


Figura 4.8 – Altura de água acima da macrotextura

Fonte: SALPICO (2009)

Salpico (2009) esclarece que a água que cai sobre o pavimento impermeável (não drenante) escoar segundo o caimento da pista, seguindo determinados percursos, as Linhas D'água. As linhas de água escoam até encontrarem os limites da pista ou algum dispositivo drenante.

O autor diz ainda que “a partir dum certo comprimento, os agregados do pavimento são cobertos pela água em escorrência, dando origem a lâmina que já é

responsável por provocar hidroplanagem parcial nos pneus do veículo”. A Figura 4.9 trás a representação dos diferentes percursos de linhas d’água.

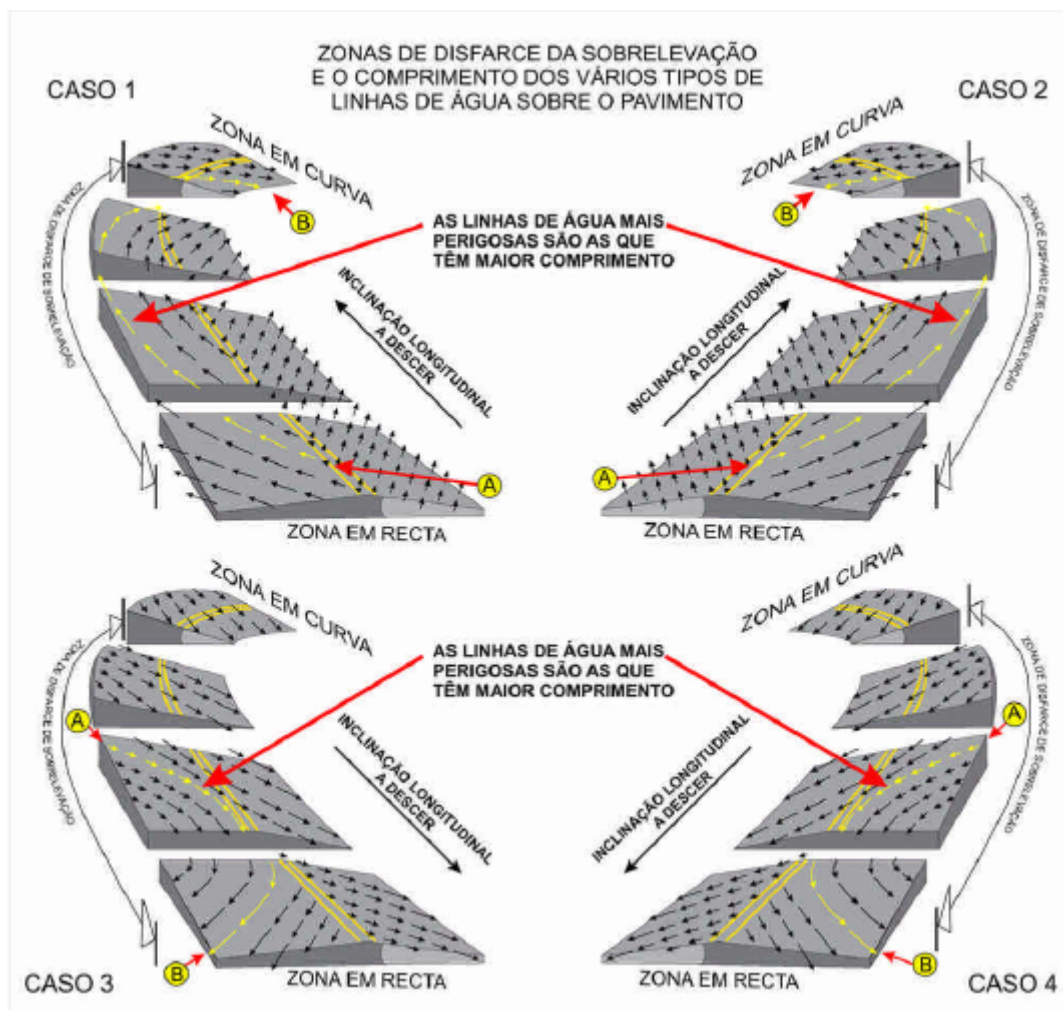


Figura 4.9 – Comprimentos diversos das linhas de água sobre o pavimento

Fonte: SALPICO (2009)

## **5 ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO**

Segundo Mattos (2009, p. 33), a aderência pneu-pavimento é altamente influenciada pela qualidade da área de contato. Quando essa área é reduzida, geralmente pela presença de algum elemento interfacial como a água, a aderência é prejudicada.

Para determinar os fatores que influenciam essa aderência é preciso entender alguns conceitos.

### **5.1 COEFICIENTE DE ATRITO**

Esta grandeza determina o nível de aderência entre o pneumático e o pavimento, sendo variável em função da pressão, composição e condições dos pneus, velocidade do veículo, condição do pavimento, geometria da via, temperatura dos corpos e do ar e presença de elementos interfaciais, como água ou óleo. (MATTOS, 2009, p. 28 e 33)

### **5.2 AQUAPLANAGEM DINÂMICA**

Soares (2011, p. 6) relata que na medida em que a velocidade do veículo aumenta, o tempo de contato entre o pneu e o pavimento diminui, o que também reduz o tempo disponível para que a água seja expulsa da superfície de interação, afetando assim a zona de efetivo contato entre ambos e proporcionalmente o atrito entre eles.

A aquaplanagem ou hidroplanagem ocorre efetivamente quando o contato entre o pneu e o pavimento é completamente perdido, devido à presença da película de água entre eles, nessa situação o atrito é insuficiente para manter o movimento da roda, o qual cessa, impedindo a frenagem e causando a perda do controle direcional do veículo. (RODRIGUES FILHO, 2006, p. 74)



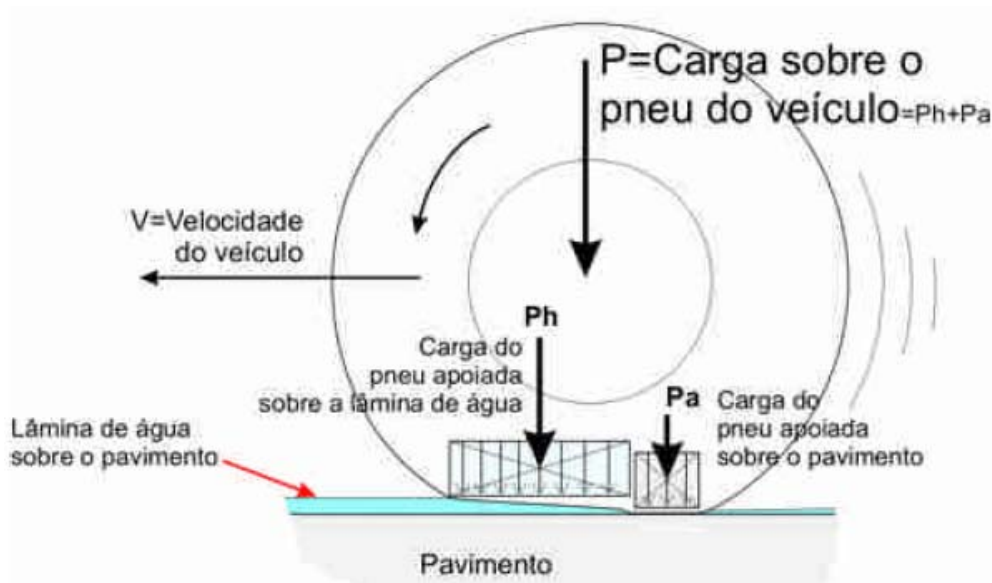


Figura 5.1 – Vista lateral de um pneu rolando sobre um pavimento com lâmina d'água

Fonte: SALPICO (2009, p. 2)

O conceito apresentado por Prado e Palma (2012, p. 39) ao aprofundarem-se no tratamento da problemática da aquaplanagem, voltados para a realidade da malha aeroportuária, explana perfeitamente o esquema da Figura 5.1:

O fenômeno ocorre pela existência de uma condição na qual a força de sustentação hidrodinâmica desenvolvida entre a banda de rodagem e o fluido que cobre a superfície de rolamento iguala ou excede a reação normal do peso da aeronave que atua na banda, capaz de levantar e separar o pneu do pavimento. Assim, perde-se o contato entre a banda de rodagem e a superfície de rolamento, quando a banda de rodagem galga a lâmina d'água, podendo resultar em perda do controle direcional [...].

### 5.3 VISCOPLANAGEM

Silva (2008, p. 28) descreve que a Viscoplanagem ou Hidroplanagem Viscosa “ocorre quando uma fina película de contaminante (água) age como lubrificante de uma superfície asfáltica, assim reduzindo o atrito entre pneu-pavimento, mesmo em baixas velocidades”. Salpico (2009, p. 3) complementa ao ressaltar que esse risco de ocorrência é maior quando a água está contaminada com argila ou silte, por exemplo.

Observa-se que a viscoplanagem ocorre para alturas de lâmina d'água inferiores a 0,10mm, quando o filme de água não consegue ser totalmente expulso da superfície de interação devido ao curto período de contato entre as mesmas, o que pode ocorrer em superfícies de pistas extremamente lisas ou com depósito de borracha de pneus. (MATTOS, 2009, p.37; LUDWIG, 2012, p. 29)

#### 5.4 VELOCIDADE CRÍTICA DE HIDROPLANAGEM

Soares (2011, p. 13) descreve-a como sendo aquela a partir da qual ocorre a aquaplanagem total, concluindo a partir disso que a velocidade a ser praticada nas vias deve estar suficientemente abaixo dela. O cálculo dessa velocidade está associado à macrotextura do pavimento, à intensidade de precipitação, à pressão dos pneus, profundidades de suas ranhuras e etc. Há diversas equações já consagradas para a realização desse cálculo, as quais serão apresentadas adiante.

O esquema da Figura 5.2 representa o fenômeno da aquaplanagem, de forma gradativa, de acordo com a aproximação da velocidade crítica.

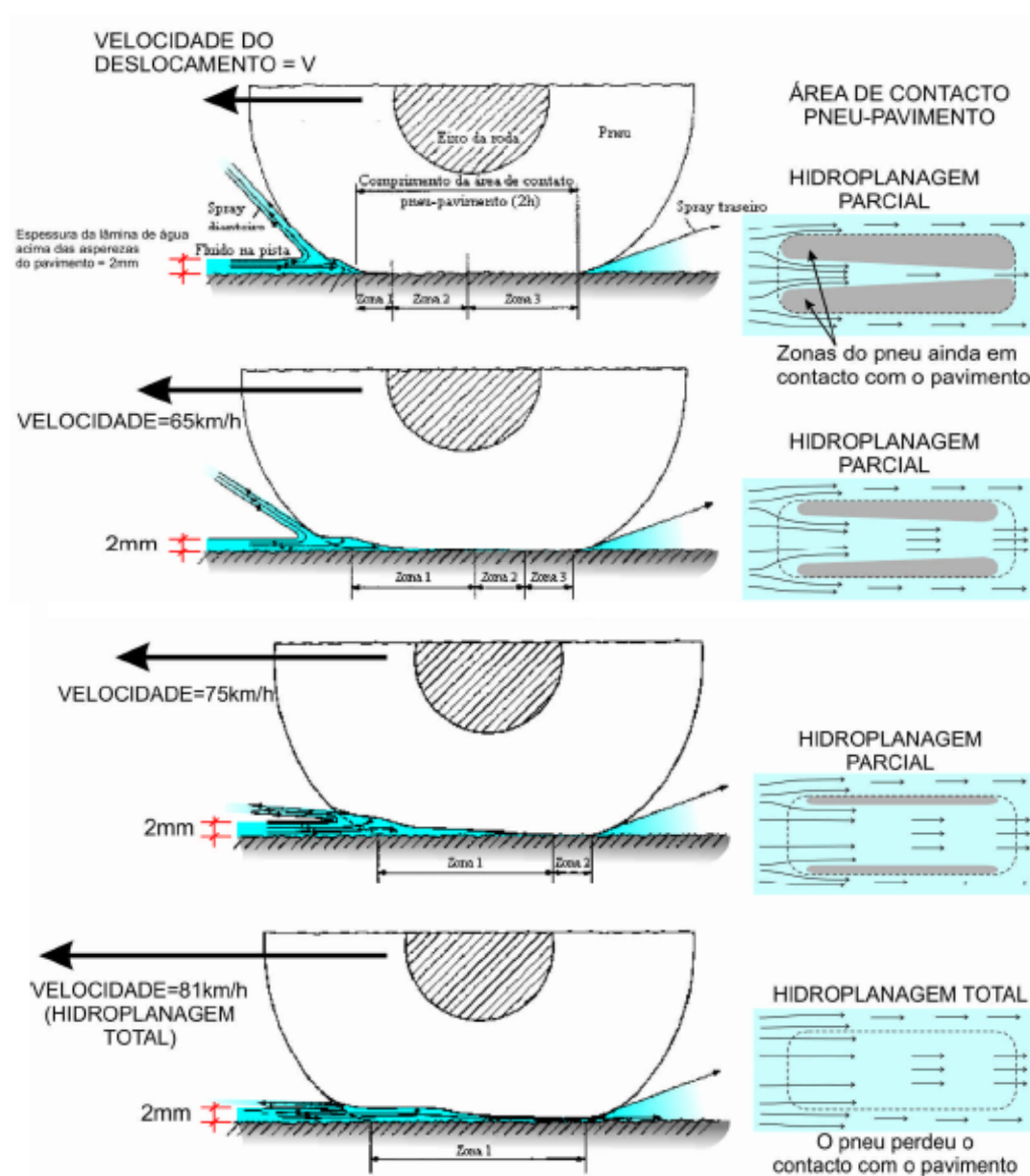


Figura 5.2 – Variação da área de contato pneu-pavimento

Fonte: SALPICO (2009, p. 1)



## 6 ESTUDO DA ESPESSURA DA LÂMINA D'ÁGUA

Devido à insuficiência de alguns sistemas de drenagem ou à ocorrência de chuvas com intensidade de precipitação superior à considerada em projeto, ou ainda à degradação da superfície da pista ou deficiência em sua manutenção talvez não seja possível escoar todo o volume de água precipitado, o que ocasiona na formação da lâmina d'água.

Nos tópicos a seguir são apresentadas equações que estimam a espessura da lâmina d'água, possibilitando que este valor seja conhecido sem a necessidade de intervenção direta na pista. Para tal deve-se conhecer previamente algumas características da mesma, as variáveis.

### 6.1 GALLAWAY (1979)

Este método empírico, de acordo com Prado e Palma (2012), foi desenvolvido por Gallaway B.M. *et al.* para o departamento de Transportes de Projetos Hidráulicos do Departamento de Transportes do Texas, em 2004. Soares (2011) afirma que Gallaway baseou-se em resultados experimentais de escoamento de águas pluviais em diversos tipos de pavimentos para a elaboração da seguinte equação:

$$h_{\text{Gallaway}} = 0,01485 \cdot \left[ \frac{Aa^{0,11} \cdot Lw^{0,43} \cdot ip^{0,59}}{i^{0,42}} \right] - Aa$$

Onde:

$h_{\text{Gallaway}}$  (mm) – altura da lâmina d'água;

$Aa$  (mm) – profundidade média da macrotextura;

$Lw$  (m) – comprimento do percurso de escoamento;

$ip$  (mm/hora) – intensidade de precipitação;

$i$  (m/m) – inclinação transversal da pista.

### 6.2 PAVDRN (1988)

Segundo Prado e Palma (2012) este método foi desenvolvido pela Universidade da Pensilvânia. PAVDRN é um software que consiste de uma equação unidimensional da onda cinemática.

$$h_{\text{PAVDRN}} = \left[ \frac{n \cdot Lw \cdot ip_e}{105,425 \cdot i^{0,5}} \right]^{0,6} - Aa$$

Onde:

$h_{\text{PAVDRN}}$  (mm) – altura da lâmina d'água;

$Aa$  (mm) – profundidade média da macrotextura;

$Lw$  (m) – comprimento do percurso de escoamento;

$i$  (m/m) – inclinação transversal da pista;

$ip_e$  (mm/hora) – intensidade de precipitação efetiva;

$ipe = ip - f$  = (intensidade de precipitação - taxa de permeabilidade do pavimento);

$n$  (s/m<sup>1/3</sup>) – coeficiente de rugosidade de Manning.

### 6.3 ANDERSON (1998)

Soares (2011) cita que “a grande evolução deste estudo prende-se com a introdução da temperatura da água, bem como o comportamento da água face a cada tipo de pavimento”.

$$h_{\text{Anderson}} = \left[ \frac{n \cdot Lw \cdot ip_e}{36,1 \cdot iw^{0,5}} \right]^{0,6} - Aa$$

Onde:

$h_{\text{Anderson}}$  (mm) – altura da lâmina d'água;

$n$  (s/m<sup>1/3</sup>) – coeficiente de rugosidade de Manning;

$Lw$  (m) – comprimento do percurso de escoamento;

$Aa$  (mm) – profundidade média da macrotextura;

$ip_e$  (mm/hora) – intensidade de precipitação efetiva;

$ipe = ip - f$  = (intensidade de precipitação – taxa de permeabilidade do pavimento);

$iw$  (m/m) – inclinação da linha de água.

A fim de distinguir o escoamento superficial nos diversos pavimentos, Anderson determinou o seguinte:

- para pavimentos em concreto de cimento  $\rightarrow n = \frac{0,319}{N_R^{0,480}}$ ,  $N_R < 1000$   
 $\rightarrow n = \frac{0,345}{N_R^{0,502}}$ ,  $N_R < 500$

- para pavimentos em concreto asfáltico  $\rightarrow n = 0,0823 \cdot N_R^{-0,174}$
- para pavimentos em concreto asfáltico drenante  $\rightarrow n = \frac{1,49 \cdot iw^{0,306}}{N_R^{0,424}}$

Sendo, o Número de Reynolds:  $N_R = \frac{q}{v}$

Onde:

$q$  (m<sup>3</sup>/s/m) – quantidade de fluido por unidade de comprimento;

$v$  (m<sup>3</sup>/s) – viscosidade cinemática da água.

A viscosidade cinemática da água é influenciada pela temperatura da mesma, e encontra-se apresentada para alguns valores na Tabela 6.1:

Tabela 6.1 – Viscosidade cinemática da água em condições normais de pressão e com variação de temperatura.

| Temperatura (°C) | Viscosidade Cinemática – $v$ (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s) |
|------------------|---|
| 0                | 1,785   |
| 5                | 1,547   |
| 10               | 1,308   |
| 15               | 1,140   |
| 20               | 1,003   |
| 25               | 0,893   |
| 30               | 0,801   |

Fonte: LENCASTRE (1996) *apud* SOARES (2011)

#### 6.4 PRADO E PALMA (2012)

O método foi desenvolvido e apresentado por Prado e Palma, no ano de 2012, na Revista Científica de Segurança em Voo, Conexão SIPAER. Consiste da utilização da equação de Manning aplicada para o dimensionamento de condutos livres.

$$h_{Prado e Palma} = 0,07638 \cdot \left[ \frac{(C \cdot ip \cdot n \cdot L)^{0,6}}{i^{0,3}} \right] - Aa$$

Onde:

$h_{Prado e Palma}$  (mm) – altura da lâmina d'água;

$C$  – coeficiente de escoamento superficial;

$ip$  (mm/hora) – intensidade de precipitação;

$n \text{ (s/m}^{1/3}\text{)}$  – coeficiente de rugosidade de Manning;

$L \text{ (m)}$  – largura da pista;

$i \text{ (m/m)}$  – inclinação transversal da pista;

$Aa \text{ (mm)}$  – profundidade média da macrotextura.

## 7 ESTUDO DA VELOCIDADE CRÍTICA DE AQUAPLANAGEM

Apesar de conhecidas as causas da formação da lâmina d'água não há forma de mitigá-la imediatamente, porém, é necessário manter as condições de segurança durante o tráfego. Para tanto a consciência e experiência instruem os motoristas a reduzirem a velocidade de rodagem.

As equações apresentadas abaixo tem a função de determinar a que valor a velocidade deve ser reduzida para evitar a aquaplanagem.

### 7.1 MÉTODO DE GALLAWAY

Salpico (2009) afirma que a expressão de Gallaway é utilizada desde a década de 70 e que não deve ser utilizada para valores de lâmina d'água muito baixos. A validade dessa equação se dá para valores de  $h > 2,413\text{mm}$ .

$$V_h (Gallaway) = 0,9143.SD^{0,04}.P^{0,3}.(TD + 0,794)^{0,06}.A$$

Onde:

$V_h (Gallaway)$  (km/h) – velocidade crítica de hidroplanagem;

SD (Spin Down Speed) – perda de rotação do pneu devido a pressão da água. Considera-se SD=10 no início da hidroplanagem;

P (kPa) – pressão do pneu;

TD (mm) – profundidade das ranhuras do rasto dos pneus

A – maior valor obtido entre  $\frac{12,639}{h^{0,06}} + 3,507$  e  $\left[\frac{22,351}{h^{0,06}} - 4,970\right].Aa^{0,14}$

h (mm) – altura da lâmina d'água;

Aa (mm) – profundidade média da macrotextura.

### 7.2 MÉTODO DE FRANÇA (1988)

Soares (2011) apresenta a expressão de Gallaway modificada por França, o qual desconsiderou as características dos pneus e sua pressão, além de ter realizado a conversão das unidades para o sistema métrico. A validade da equação permanece para valores de  $h > 2,413\text{mm}$ .

$$V_h (França) = 4,580.(1,181.\varepsilon_1 + 1)^{0,06}.A$$

Onde:

$V_h$  (França) (km/h) – velocidade crítica de hidroplanagem;

$\epsilon_1$  (mm) – altura das asperezas do pavimento;

$A$  – maior valor obtido entre  $\frac{12,639}{h^{0,06}} + 3,507$  e  $\left[ \frac{22,351}{h^{0,06}} - 4,970 \right] \cdot Aa^{0,14}$

$h$  (mm) – altura da lâmina d'água;

$Aa$  (mm) – profundidade média da macrotextura.

### 7.3 MÉTODO DE AGRAWALL E HENRY

Ainda de acordo com Soares (2011), o método definido para valores de  $h < 2,413\text{mm}$  é o de Agrawall, o qual foi obtido a partir de uma série de ensaios com veículos cuja pressão de enchimento dos pneus foi de 165 kPa e com profundidade das ranhuras  $TD = 2,4\text{mm}$ .

$$V_h (Agrawall) = 96,899 \cdot h^{-0,259}$$

Onde:

$V_h$  (Agrawall) (km/h) – velocidade crítica de hidroplanagem;

$h$  (mm) – altura da lâmina d'água.

## 8 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

De forma a observar a variação de resultados em cada um dos métodos foram elaborados alguns gráficos. Em cada gráfico são apresentados os valores de Altura da Lâmina D'água correspondente à variação da Intensidade de Precipitação de Chuvas, da Inclinação da Linha d'água, da Profundidade da Macrotextura e do Coeficiente de Escoamento Superficial.

Como as equações apresentam diversas variáveis as que não estavam sendo avaliadas tiveram seus valores fixados, arbitrariamente, de forma a simular uma situação real:  $Aa=0,8\text{mm}$ ;  $n=0,02$ ;  $C=0,9$ ;  $i=1,5\%$ ;  $L=14,0\text{m}$ ; e  $ip=60\text{mm/hora}$ .

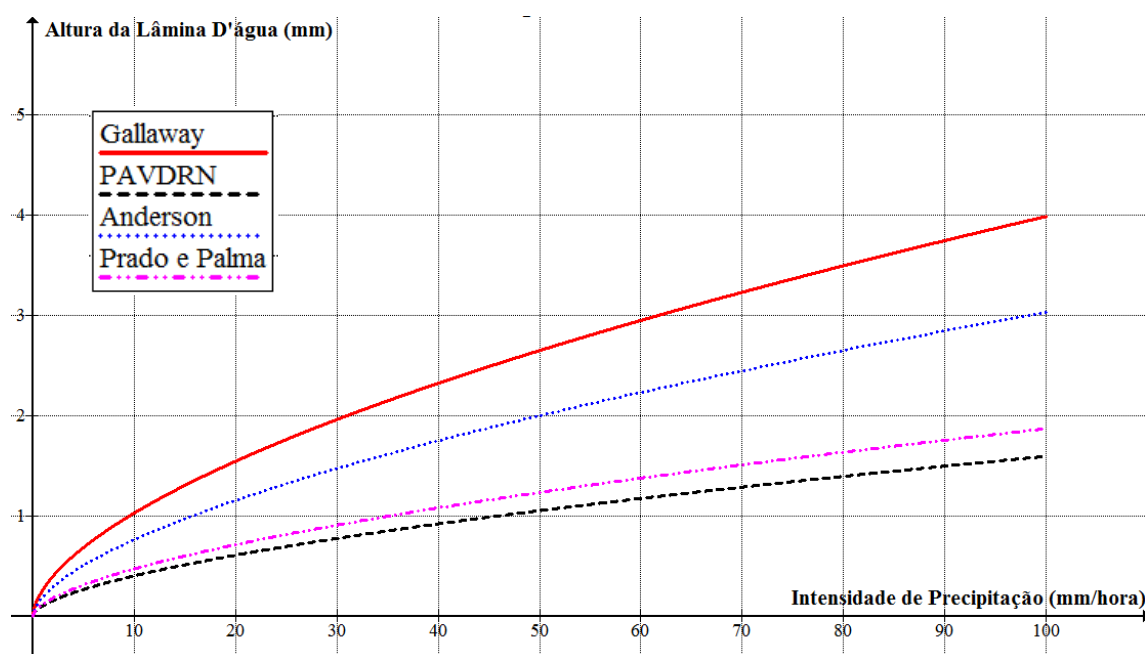


Gráfico 8.1 – Altura da Lâmina D'água x Intensidade de Precipitação

Fonte: PRÓPRIA (2014)

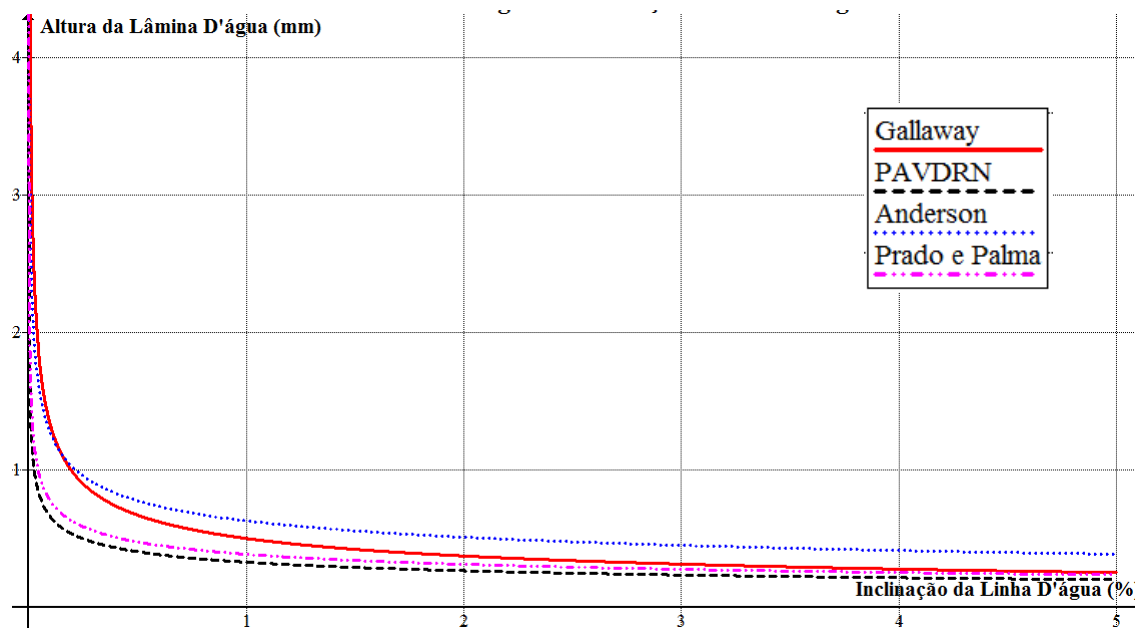


Gráfico 8.2 – Altura da Lâmina D'água x Inclinação da Linha D'água

Fonte: PRÓPRIA (2014)

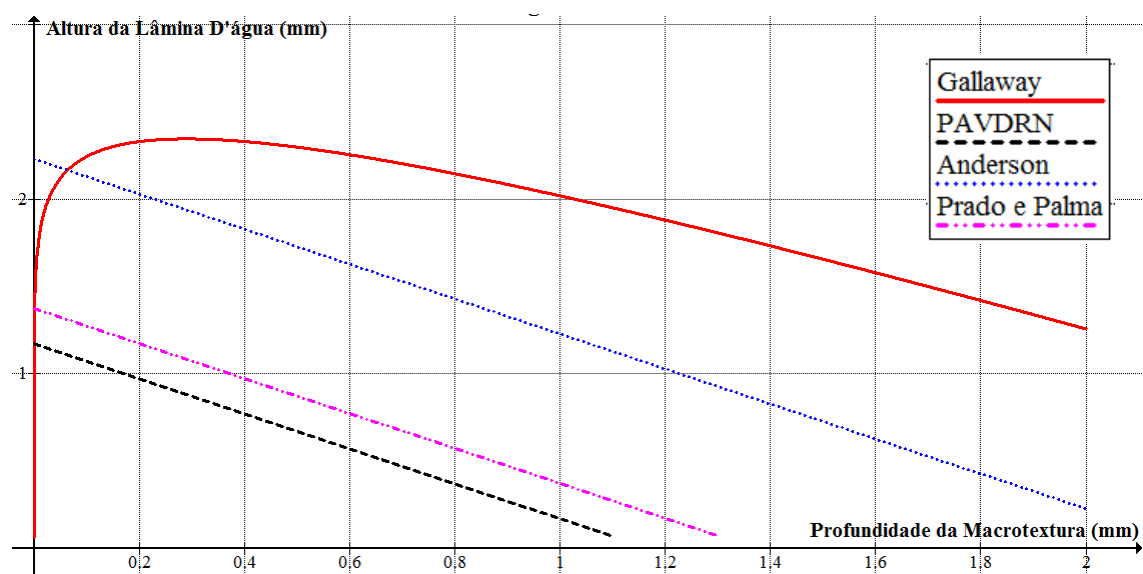


Gráfico 8.3 – Altura da Lâmina D'água x Profundidade da Macrotextura

Fonte: PRÓPRIA (2014)



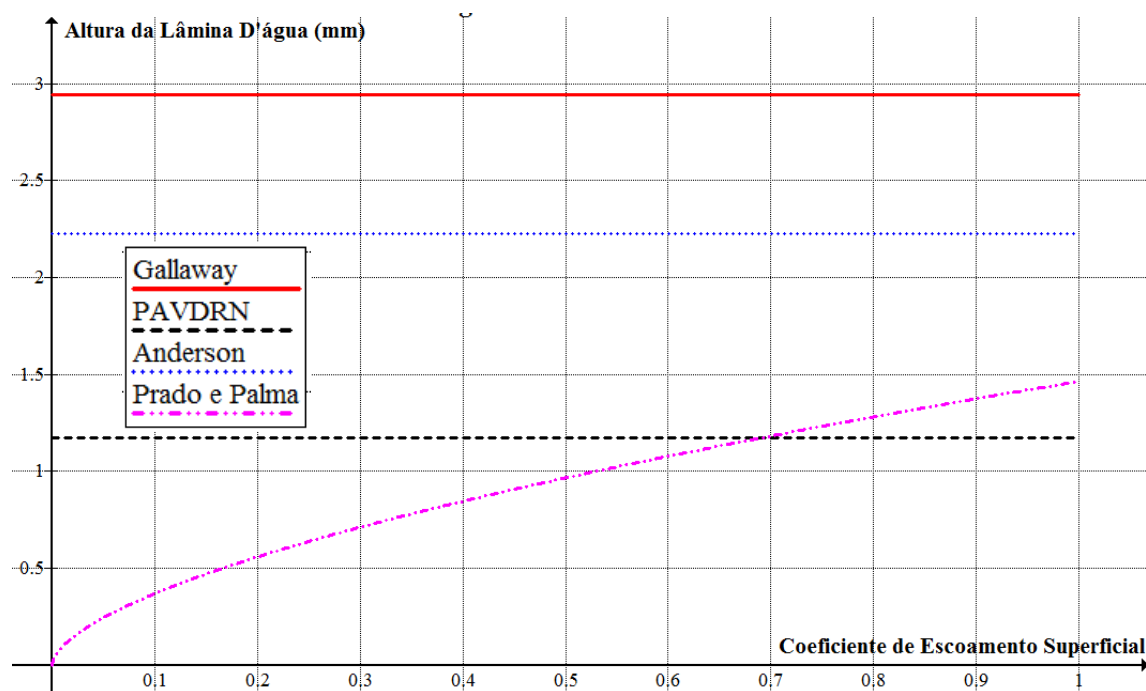


Gráfico 8.4 – Altura da Lâmina D'água x Coeficiente de Escoamento Superficial

Fonte: PRÓPRIA (2014)

Foram também comparados os métodos de obtenção da Velocidade Crítica de Aquaplanagem, fixando os valores de pressão dos pneus,  $P=165\text{kPa}$ , de profundidade das ranhuras,  $TD=2,4\text{mm}$ , e de profundidade da macrotextura,  $Aa=0,8\text{mm}$ . Conforme segue na Tabela 8.1:

Tabela 8.1 – Valores de velocidade crítica de aquaplanagem correspondentes às espessuras de lâmina d'água.

| Altura da Lâmina | A        | Gallaway                        | França                          | Agrawall                                  |
|------------------|----------|---------------------------------|---------------------------------|---|
| h (mm)           | Item 7.1 | $V_h = 4,973 \cdot A$<br>(Km/h) | $V_h = 4,766 \cdot A$<br>(Km/h) | $V_h = 96,899 \cdot h^{-0,259}$<br>(Km/h) |
| 1                | 16,846   | 83                              | 80                              | 96  |
| 2                | 15,964   | 79                              | 76                              | 80  |
| 3                | 15,464   | 76                              | 73                              | 72  |
| 4                | 15,137   | 75                              | 72                              | 67  |
| 5                | 14,983   | 74                              | 71                              | 63  |

Fonte: PRÓPRIA (2014)

## 9 CONCLUSÃO

Após a observação das equações apresentadas nos capítulos anteriores para a obtenção das estimativas de espessura de lâmina d'água e velocidade crítica de aquaplanagem, além da comparação das mesmas, com as respectivas variações de parâmetros pode-se observar que: nos gráficos de Altura da Lâmina D'água x Intensidade de Chuva, Altura da Lâmina D'água x Inclinação da Linha D'água e Altura da Lâmina D'água x Profundidade da Macrotextura não houve discrepâncias entre os resultados dos diversos métodos. Já no gráfico Altura da Lâmina D'água x Coeficiente de Escoamento Superficial apenas o método de Prado e Palma apresentou variação, pois os demais não levam em conta em sua composição o Coeficiente de Escoamento. No entanto, apesar de obviamente este fator influenciar na espessura em questão, cabem estudos de campo com medidas *in loco* para confirmar qual dos métodos estima com mais precisão o valor desejado.

Igualmente, em relação à Velocidade Crítica de Aquaplanagem, todos os métodos observados apresentam valores coerentes e que precisam ser investigados em uma situação real com a ajuda de equipamentos específicos, para que assim fique claro qual deles apresenta valores mais semelhantes aos de uma situação real.

A determinação desses valores pode ser de muita utilidade para os CCO – Centros de Controle Operacionais das rodovias. Ao passo que a concessionária levante as variáveis de suas pistas e assim aplique nas equações, precisará apenas do auxílio de um pluviômetro, para então em uma situação de precipitação definir qual a velocidade segura para tráfego no momento. Podendo ainda transmitir esta informação aos usuários através de painéis de mensagem variável.

## REFERÊNCIAS

- ABESC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM. **Prática Recomendada PR-3**. [São Paulo], mar. 2013, 8 p. Disponível em: < [www.abesc.org.br/downloads/cppr3.pdf](http://www.abesc.org.br/downloads/cppr3.pdf) > Acesso em: 14 mar. 2014.
- ALMEIDA, G. C. P. **Apostila de Drenagem Rodoviária**. Vitória: Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo, 2007. 161 p. Disponível em: <<ftp://ftp.cefetes.br/cursos/transportes/Zorzal/Drenagem%20Rodovi%20ria/Apostila%20de%20drenagem%20rodovi%20ria%20do%20prof%20Gil%20Almeida.doc> livro livre gil almeida drenagem>. Acesso em: 15 ago. 2013.
- AZEVEDO, A. M. **Consideração Sobre a Drenagem Subsuperficial na Vida Útil dos Pavimentos Rodoviários**. 2007. 160 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <[www.teses.usp.br/teses/.../3/3138/.../Dissertacao\\_AngelaMAzevedo.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/.../3/3138/.../Dissertacao_AngelaMAzevedo.pdf)>. Acesso em: 19 mar. 2014.
- BERNUCCI, L. B; MOTTA L. M. G; CERATTI, J. A. P; SOARES, B. J. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008. 502 p. Disponível em: <[http://www.proasfalto.com.br/07\\_download.htm](http://www.proasfalto.com.br/07_download.htm)>. Acesso em: 19 jun. 2013.
- CET – COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO. **Fatos e Estatísticas de Acidentes de Trânsito em São Paulo – 2011**. São Paulo, 2012. 86 p. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/media/186829/fat%20e%20est%202011.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2013.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTADAS DE RODAGEM. **Glossário de Termos Técnicos e Rodoviários**. Rio de Janeiro, 1997. 296 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/indexmanuais.php>>. Acesso em: 09 abr. 2013.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006. 314 p. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/..%5Carquivos\\_internet%5Cipr%5Cipr\\_new%5Cmanuais%5CManual\\_de\\_Restauracao.pdf](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/..%5Carquivos_internet%5Cipr%5Cipr_new%5Cmanuais%5CManual_de_Restauracao.pdf)>. Acesso em: 03 mar. 2014.
- GOODYEAR. **Boletim de Orientação Técnica**. [São Paulo], jul. 2010, 27 p. Disponível em: <<http://www.goodyear.com.br/pneus/pneus-caminhoes-onibus/catalogo-caminhoes-onibus.html>> Acesso em: 22 nov. 2013.
- LUDWIG, E. R. **Metodologia para Monitoramento de Lâmina D'água em Pavimentos de Pistas de Aeroportos**. 2012. 117 p. Dissertação (Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. Disponível em:

<[http://www.bd.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista\\_resumo.php?num\\_tese=63141](http://www.bd.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=63141)>. Acesso em: 08 nov. 2013.

MATTOS, J. R. G. **Avaliação da Aderência Pneu-Pavimento e Tendência de Desempenho para a Rodovia BR-290/RS**. 2009. 136 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/30215>>. Acesso em: 05 maio 2013.

NÉSTOR HUAMÁN E ASOCIADOS. **Pêndulo britânico**. 1 imagem. Perú. [2014]. Disponível em: <<http://www.nestorhuaman.pe/servicios>>. Acesso em: 18 mar. 2014.

PEREIRA, A. C. O. **Influência da Drenagem Superficial no Desempenho de Pavimentos Asfálticos**. 2003. 222 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-27062007-191216/pt-br.php>>. Acesso em: 08 nov. 2013.

PINTO, J. I. B. R. **Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários**. 2003. 261 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11100>>. Acesso em: 13 mai. 2013.

PRADO, L. A. E; PALMA G. **Metodologia Analítica para Estimativa da Lâmina D'água em Pavimentos Aeroportuários**. Revista Conexão SIPAER, Brasília, v. 3, n. 2, 2012. 28 p. Artigo Científico. São Paulo. Disponível em: <<http://inseer.ibict.br/sipaer/index.php/sipaer/article/view/144>>. Acesso em: 11 ago. 2012.

RODRIGUES FILHO, O. S. **Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários – Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas**. 2006. 251 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-01122006-142419/pt-br.php>>. Acesso em: 05 mai. 2013.

SALPICO, F.J. C. R. Pires. **Estudo de Segurança Rodoviárias**. Lisboa: Observatório de Segurança de Estradas e Cidades – ASEC, 2009. 47 p. Artigo Científico. Disponível em: <<http://www.cril-segura.com/hidroplanagem.pdf>> Acesso em: 17 ago. 2013.

SCAGLIUSI, S. R. **Reciclagem de Pneus Inservíveis – Alternativa Sustentável à Preservação do Meio Ambiente**. 2010. 18 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Tecnologia, FUNDETEC, São Paulo. Disponível em: <[http://faculdefundetec.com.br/img/revista\\_academica/pdf/artigo\\_sandra\\_scagliuse.pdf](http://faculdefundetec.com.br/img/revista_academica/pdf/artigo_sandra_scagliuse.pdf)>. Acesso em: 19 jun. 2013.

SILVA, J. P. S. **Aderência Pneu-pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários**. 2008. 134 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/3470>>. Acesso em: 07 jun. 2013.

SOARES, A. F. S. **Análise da Ocorrência de Hidroplanagem num caso Real**. 2011. 160 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. Disponível em: <[http://run.unl.pt/bitstream/10362/5830/1/Soares\\_2011.pdf](http://run.unl.pt/bitstream/10362/5830/1/Soares_2011.pdf)>. Acesso em: 06 mar. 2013.

SUPER MIX. **Amostra de Concreto Poroso**. 1 imagem. Belo Horizonte. [2010]. Disponível em: <[http://www.supermix.com.br/ser\\_poroso.php](http://www.supermix.com.br/ser_poroso.php)>. Acesso em: 20 mar. 2014.

SUZUKI, C. Y; AZEVEDO, A. M; JÚNIOR, F. I, K. **Drenagem Subsuperficial de Pavimentos – Conceitos e Dimensionamento**. São Paulo: Oficina do Texto, 2013. 240 p.

TOMAZ, P. **Apostila de Pavimento Poroso**. Guarulhos: Associação Plínio Tomaz, 2009. 18p. Disponível em: <[www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo60\\_pavimento\\_poroso.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo60_pavimento_poroso.pdf)>. Acesso em: 18 mar. 2014.

XANCAR PNEUS. **Estrutura do Pneu**. 1 imagem. São Gonçalo, [2011]. Disponível em: <<http://www.xancarpneus.com.br/pneu.html>>. Acesso em: 22 nov. 2013.