

**SEMINÁRIO NACIONAL DAS  
MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS  
FLORIANÓPOLIS 22 à 25 de AGOSTO/2000**

**INFLUÊNCIA DA DRENAGEM SUPERFICIAL  
DE PAVIMENTOS NA SEGURANÇA RODOVIÁRIA**

**Carlos Williams U. Carrion  
Eng. Consultor, Professor Assistente PUC-Minas**

## SEMINÁRIO NACIONAL DAS MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS

### “INFLUÊNCIA DA DRENAGEM SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS NA SEGURANÇA RODOVIÁRIA”

Carlos Williams U. Carrion

Eng. Consultor, Professor Assistente PUC-Minas

#### RESUMO

Atualmente as novas teorias, as modernas técnicas e os eficientes materiais de construção disponíveis estão revolucionando as técnicas de Projeto e Construção de Obras de Drenagem de Rodovias.

Os dados estatísticos levantados, através de pesquisas do DER-SP, comprovam a maior probabilidade de acidentes por derrapagens em pistas molhadas. O atrito de uma pista nestas condições é consideravelmente inferior àquele encontrado quando a mesma está seca. Esta redução se dá por não haver expulsão total de água que se encontra entre o pneu e o pavimento.

Neste trabalho propomos analisar os problemas de Segurança do usuário de rodovias decorrentes: da acumulação de água na superfície de rolamento que tornam os pavimentos escorregadios, dos perigos da hidroplanagem, da perda de visibilidade devido à água aspergida, da presença de problemas construtivos decorrentes da infiltração superficial de água, do efeito do bombeamento devido ao tráfego, do estado de conservação dos pneus, da textura do pavimento e do decréscimo do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade do veículo.

Preliminarmente, descrevemos o fenômeno da derrapagem com pista seca e o seu aprofundamento com a presença de água. A análise fica restrita ao estudo do veículo, da influência do estado de conservação dos pneus e a via, partindo da hipótese que o terceiro elemento interveniente nos acidentes, o homem, seja um fator inalterado, isto é, um motorista em idênticas condições dirigindo em pista seca ou molhada.

Finalmente, apresentamos procedimentos que nos permitam avaliar a redução da capacidade viária e da segurança em função da ocorrência de chuvas intensas, da derrapagem, da hidroplanagem, dos fatores físicos da via, dos fatores de tráfego e outros distúrbios no meio ambiente e no pavimento.

## 1 – INTRODUÇÃO

Durante séculos os Engenheiros rodoviários perceberam que a água acelera a deterioração e a destruição dos pavimentos, e concluíram que a boa drenagem é uma das necessidades básicas dos pavimentos flexíveis. É preciso considerar que o excesso de água está quase sempre em evidência durante os períodos em que a deterioração e colapso do pavimento ocorrem mais rapidamente.

Para permitir que somente pequenos volumes de água superficiais atravessem a rodovia, o Engenheiro rodoviário projeta drenos superficiais, que são estruturas de drenagem com pequena seção de vazão, com 0,40m de diâmetro máximo. Para dar vazão a maiores volumes de águas superficiais são projetados bueiros que são estruturas de drenagem maiores e com diâmetro mínimo de 0,40m.

As determinações da vazão de dimensionamento de bueiros necessitam de estudos cuidadosos para que se possa projetar com o máximo de economia e segurança. Assim, as características de drenagem de um pavimento e de suas vizinhanças podem afetar substancialmente seu comportamento. Ocorre, que a lenta drenagem das águas pluviais para fora dos pavimentos é, freqüentemente, fator primordial na sua prematura deterioração. Em conseqüência, os pavimentos rodoviários não drenados irão requerer grandes quantidades de reparos, com elevados custos de reconstrução e de manutenção, muito antes de atingir o limite da vida útil prevista para o pavimento.

Por outro lado, os pavimentos projetados com sistema de drenagem rápida e adequados, suportarão os carregamentos durante o período de projeto, com serviços de manutenção periódicos e rotineiros que prolongarão sua vida, minimizando os custos de restauração.

Alertamos neste trabalho para os prejuízos resultantes de uma drenagem insuficiente ou inadequada da rodovia, que traz como conseqüência riscos à Segurança do usuário e redução da capacidade viária, com perigo iminente de acidentes, devido à acumulação de água sobre a pista, o que a tornaria mais escorregadia, dos perigos da hidroplanagem, da perda de visibilidade devido à água aspergida, da presença de problemas construtivos decorrentes da infiltração superficial de água, do efeito do bombeamento devido ao tráfego, do estado de conservação dos pneus, da textura do pavimento e do decréscimo do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade do veículo.

## 2 – INFLUÊNCIA DA DRENAGEM SUPERFICIAL NA SEGURANÇA RODOVIARIA

Os dados estatísticos levantados, através de pesquisas do DER-SP comprovam a maior probabilidade de acidentes por derrapagens em pistas molhadas. O atrito de uma pista nestas condições é consideravelmente inferior aquele encontrado quando a mesma está seca. Esta redução se dá por não haver expulsão total da água que se encontra entre o pneu e o pavimento.

A seguir, descrevemos o fenômeno da derrapagem com pista seca e o seu aprofundamento com a presença de água. A análise fica restrita ao estudo do veículo, da

influência do estado de conservação dos pneus e da via, partindo da hipótese que o terceiro elemento interveniente nos acidentes, o homem, seja um fator inalterado, isto é, um motorista em idênticas condições dirigindo em pista seca ou molhada.

### 3 – ANÁLISE DOS FATORES DE RISCO NA SEGURANÇA RODOVIÁRIA

Entre os principais fatores de risco decorrente da inadequada drenagem superficial da rodovia podemos citar:

- A derrapagem
- A hidroplanagem
- O estado de conservação dos pneus
- A textura do pavimento
- O decréscimo do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade
- A presença de lâminas d'água na superfície do pavimento
- A aderência pneu x pavimento

#### 3.1. FENÔMENO DA DERRAPAGEM

Resistência à derrapagem é uma medida da capacidade da superfície da via de evitar deslizamentos no contato entre o pneu e o pavimento durante manobras executadas por veículos.

Os problemas se dão pela insuficiência da força de atrito, no contato entre o pneu e o pavimento, em algumas circunstâncias críticas como na curva, onde a força centrífuga tem que ser equilibrada pela força de atrito transversal e por um componente do peso.

Este equilíbrio se introduz no projeto geométrico da via, onde se especifica a superelevação que é a adição de uma altura na borda externa da curva. A superelevação é função da velocidade de projeto, do raio da curva e da textura média do pavimento, e é calculada através da seguinte equação:

$$e = \frac{v^2}{127 \cdot R} - f$$

Sendo: e = superelevação

v = velocidade em km/h

R = raio de curva em m

f = coeficiente de atrito transversal

A quantificação do coeficiente de atrito transversal é ainda tema de pesquisa, e sua verificação não é usual no Brasil. O DNER adota a equação 3.1 – 1 para a determinação do coeficiente de atrito e, mais recentemente, passou a adotar a tabela 3.1. ou a equação 3.1. – 2 recomendadas pela AASHTO.

Os componentes do fenômeno da derrapagem, com pista molhada são os mesmos que com pista seca, agravados pela presença da água.

O atrito por deslizamento é a soma de parcelas de atrito devido à adesão e a histerese, ou seja:

$$f_d = f_a + f_h$$

Onde:  $f_d$  = coef. atrito de deslizamento

$f_a$  = coef. atrito devido à adesão

$f_h$  = coef. atrito devido a histerese

O atrito devido à adesão das moléculas dos dois materiais (pneu x pavimento) depende diretamente das interpenetrações das superfícies, das dimensões da área de contato e da velocidade de deslizamento. Indiretamente a composição da borracha do pneu, a temperatura e a textura do pavimento também influem.

O atrito atua no contato pneu x pavimento (banda de rodagem) ocasionando a perda de energia cinética. Nas baixas velocidades, a maior parcela do coeficiente de atrito é devido à adesão.

Equação 3.1. – 1

$$f = \frac{1}{1,4 \cdot V}$$

Onde:

$f$  = coef. de atrito

$V$  = vel. diretriz em km/h

**Tabela 3.1 – Coeficiente de Atrito**

| V | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | 120  |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| f | 0.20 | 0.18 | 0.16 | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.11 |

Equação 3.1. – 2

$$f = 0,19 - \frac{V}{1600}$$

$V$  em km/h

Outra circunstância onde o atrito é fundamental é no instante da aplicação do freio, para redução da velocidade ou frenagem do veículo. Neste caso, a força atuante é o atrito longitudinal, que é usado no projeto geométrico para a definição da distância de visibilidade de parada, e que pode ser dividida em 03 parcelas:

$$D_1 = d_p + d_f + d_s, \text{ onde:}$$

$D_1$  = distância simples de visibilidade;

$d_p$  = distância percorrida pelo veículo durante o tempo de percepção e reação do motorista;

$d_f$  = distância percorrida pelo veículo durante a frenagem;

$d_s$  = distância de segurança.

A parcela que tem contribuição do coeficiente de atrito é a distância percorrida pelo veículo durante a frenagem, durante o qual a energia cinética do veículo deve ser anulada pelo trabalho do atrito. A partir desta hipótese o HCM (9) deduziu a seguinte equação para a distância  $d_f$ :

$$d_f = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot f}$$

A insuficiência de atrito pode ocorrer em razão das condições do pavimento. Problemas como exsudação, desgaste do material asfáltico que compõem a textura superficial, ou mesmo a presença de materiais alheios como óleo, ou areia na pista, podem diminuir, substancialmente o valor do coeficiente de atrito.

Esta redução pode, ou não, ocorrer em locais críticos, como trechos em curva ou tangente, onde sejam necessárias as ações dos freios.

A parcela de atrito devido à histerese é consequência da deformação que ocorre na borracha do pneu, quando a banda de rodagem do mesmo desliza sobre macroirregularidades da pista.

A parcela da força de atrito aumenta com a velocidade de deslizamento. Seu valor máximo, no entanto, ocorre a velocidade extremamente alta, sendo, desta forma, possível tirar vantagens para veículos comuns.

O processo que produz as perdas, por histerese, ocorre em toda a área de contato pneu / pavimento, afetada pelas irregularidades superficiais do pavimento. É fundamental para esta parcela de atrito, que o pavimento tenha macrotextura aberta.

A presença de água na pista diminui o contato da banda de rodagem, reduzindo, principalmente o atrito devido à adesão e interferindo pouco na parcela, devido à histerese.

Como à medida que a velocidade aumenta, reduz-se o tempo de contato, e diminui o tempo disponível para que o processo de expulsão da água se complete, o atrito em pistas molhadas diminui, à medida que a velocidade aumenta, e é proporcional a área da zona de contato em que é obtido o contato a seco.

### 3.2. HIDROPLANAGEM

Hidroplanagem é o fenômeno que ocorre quando existe uma perda de contato, entre o pneu e o pavimento, devido a presença de uma película de água de espessura finita. Nestas condições, a componente de força de atrito devido à adesão é praticamente nula, e seu atrito disponível, reduz-se a valores insuficientes. Nesta situação, perde-se o contato entre o pneu e o pavimento, bem como o controle do veículo. Para que retorne este contato, ou que a roda volte a girar, a velocidade do veículo tem que reduzir sensivelmente. Existem três tipos de hidroplanagem, a seguir:

**3.2.1. Hidroplanagem Viscosa** – Ocorre devido aos efeitos da viscosidade e inércia da água, que opõem a sua expulsão da área de contato. Esse tipo de hidroplanagem exige que a superfície do pavimento seja extremamente lisa e, segundo o Instituto de Aeronáutica da Suécia, uma profundidade média de textura superficial, de apenas 0,3mm é suficiente para eliminar a hidroplanagem viscosa.

**3.2.2. Hidroplanagem Dinâmica** – Ocorre devido a presença de uma espessa camada de água, na superfície da via, à frente da área de contato do pneu com o pavimento. A água se choca com o pneu, formando uma pressão, que é proporcional ao quadrado da velocidade da roda, e a densidade da água; deforma o pneu de maneira tal que as porções de água subsequentes são capazes de penetrar na área de contato pneu/pavimento, e sustentar, parcialmente, a carga vertical do pneu.

Acima de uma certa espessura de camada de água (espessura crítica) e de determinada velocidade característica (velocidade de hidroplanagem), não existe mais contato entre o pneu e a pista. O pneu fica exposto a hidroplanagem dinâmica completa, não há perda de energia cinética por adesão, e só ocorrem pequenas perdas por histerese, no interior da área de contato.

Segundo o “Airport services Manual”, a espessura crítica da lâmina d’água, necessária para que ocorra a hidroplanagem dinâmica, em uma superfície com textura fechada e lisa, é de 2 a 3mm. Caso a pista for provida de uma boa textura, esta espessura será obrigatoriamente maior.

**3.2.3. Hidroplanagem por Desvulcanização** – O processo aparece quando ocorre o deslocamento do veículo sem que haja rotação do pneu, a área de contato ficará sujeita a repetidas deformações locais que, em razão das propriedades viscoelásticas da borracha, superaquecerão a mesma. Se este processo perdurar por um longo espaço de tempo, a temperatura na área de contato poderá alcançar níveis em que a borracha perde suas qualidades elásticas, e tornar-se praticamente plástica. Assim, uma grande parte das perdas de energia cinética por histerese desaparece, e o superaquecimento causa danos locais ao pneu.

Convém ressaltar que a ocorrência de apenas um tipo de hidroplanagem é extremamente difícil. O normal é que ocorra simultaneamente dois ou mais tipos. De acordo com pesquisas da NASA, realizadas por H.B.HORTON, existem dentro da área de contato, entre pneu e pavimento, 3 zonas distintas, que podem ser visualizadas na Fig.3.2.1. Onde:

Z1 = zona recoberta por uma espessura considerável de água (zona de hidroplanagem dinâmica)

Z2 = zona recoberta por uma delgada película de água (zona de hidroplanagem viscosa)

Z3 – zona em que a água é totalmente expulsa (zona teoricamente seca), cujo atrito contribui para a desaceleração e o controle direcional do veículo.

O coeficiente de atrito, segundo esta teoria, pode ser expresso por:

$$f_d = \frac{(Z1 + Z2) f_h + Z3 (f_d + f_a)}{A}$$

Onde:

$f_d$  = coeficiente de atrito pista molhada;

$f_a$  = coeficiente de atrito por adesão;

$f_h$  = coeficiente de atrito por histerese;

A = área total de contato

Esta equação mostra que a zona seca contribui para perda de energia cinética, usando os atritos de adesão e a histerese; as zonas molhadas (zonas 1 e 2) atuam na frenagem, devido apenas ao atrito por histerese.

Quando a espessura da lâmina d'água - L.A. ultrapassa o valor crítico, com o aumento da velocidade desenvolvem-se pressões dinâmicas na frente da roda e a água penetra na área de contato. Deste modo, a zona de aquaplanagem dinâmica (Z1) se forma e penetra na zona de aquaplanagem viscosa (Z2). A medida em que a velocidade aumentar, Z3 desaparecerá gradualmente e, ao mesmo tempo, Z1 aumentará. A uma certa velocidade crítica, se a profundidade de LA for superior à crítica, Z1 cobrirá toda a área de contato e o pneu ficará totalmente exposto a hidroplanagem dinâmica.

### 3.3. ESTADO DE CONSERVAÇÃO DOS PNEUS

Quando uma via encontra-se seca, o coeficiente de atrito situa-se entre 0,8 e 1,0 quando medido a velocidade de 100 km/h. Entretanto, quando a estrada está molhada, este coeficiente reduz-se, drasticamente, a depender da rugosidade da via e da condição do pneu. A Fig. 3.3. mostra valores típicos de coeficiente de atrito, em pista molhada, para 04 condições. Ou seja, considerando uma textura superficial lisa e uma textura superficial rugosa e, para cada uma delas, duas condições de pneu, lisos e novos. Pode-se observar que, em superfícies rugosas a diferença entre o coeficiente de atrito para os dois pneus não é muito significativa, situação esta explicável pelo fato da água existente no pavimento poder escoar, através dos canais de drenagem existentes, na superfície. Entretanto, para texturas lisas, a diferença é muito grande, pois a água não tem por onde escoar nos pneus lisos, apresentando desta forma, baixos valores de coeficientes de atrito.

A existência de um pneu novo com banda de rodagem apresentando sulcos apropriados não é suficiente para compensar a falta de atrito, resultante da textura inadequada do pavimento, conseqüentemente é perigoso transitar com pneus lisos em superfícies molhadas.

Conforme analisado no item 3.1. com uma pista molhada e a altas velocidades, a histerese dos pneus é responsável por uma parcela maior do coeficiente de atrito. Os pneus construídos com borracha com baixa histerese apresentam coeficiente de atrito em pistas molhadas superior aqueles obtidos com pneus com alta histerese, porém os mesmos se desgastam muito rapidamente, apresentando, por isso, uma vida útil mais curta.

O coeficiente de atrito entre pneus e pavimento, também é influenciado pela temperatura, pela qualidade da borracha e pela pressão dos pneus.



### 3.4. INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO PAVIMENTO

O coeficiente de atrito entre pneu e pavimento, no que diz respeito à rugosidade do pavimento, pode ser descrito em termos de duas características importantes, quais sejam:

- a) A macrotextura resultante da configuração das partículas do agregado na superfície da estrada. A macrotextura é expressa, quantitativamente pela profundidade média dos vazios intersticiais, ou mais comumente, chamado de profundidade da textura.
- b) A microtextura que seria a textura, em pequena escala, de cada partícula do agregado.

As características da superfície de rolamento apresentam diferentes efeitos no coeficiente de atrito e, conseqüentemente, na distância de parada, para as diversas situações de velocidade.

Ocorre uma grande diminuição no coeficiente de atrito em função do aumento da velocidade. Esta redução decorre da dificuldade do conjunto pneu/pavimento dispersar a água existente entre eles, e também pela redução da capacidade do pavimento em provocar deformações na banda de rodagem propiciando, com isto, a absorção da energia cinética, decorrente das perdas por histerese.

Quando dispomos de diversos canais de drenagem, ou seja, quando a superfície apresenta uma textura alta, a redução do coeficiente apresenta textura superficial lisa, e quase não ocorreram canais de drenagem no pavimento, a redução do coeficiente de atrito será muito maior.

Para velocidades baixas (< 60 km/h) em rodovias, é de vital importância que se aumente a adesão pneu/pavimento. Este aumento pode ser obtido, fazendo-se com que a macrotextura dos agregados (aspereza) seja capaz de penetrar no filme d' água, que fica no pavimento, após a água ter sido drenada.

Pode-se verificar, que a distância de parada é inversamente proporcional à espessura da textura superficial, conseqüentemente, seria ideal dispor da máxima textura possível. O problema é que existem outros conflitos, que não só a necessidade de um alto coeficiente de atrito entre pneu e pavimento, para determinar a espessura da textura superficial.

Com relação ao tipo de textura superficial da camada de rolamento do pavimento rodoviário, que tem criado conflitos entre projetistas de pavimentos, fabricantes de pneus e veículos e engenheiros de segurança, apresentamos as peculiaridades da textura lisa:

- A probabilidade de acidentes devido a falta de aderência é alta;
- O nível de ruído é baixo;
- A resistência ao rolamento é baixa, significando economia de combustível;
- O consumo de pneus decorrente da abrasão é baixo.

De outro lado, texturas ásperas apresentam as seguintes peculiaridades:

- A probabilidade de acidentes devido a falta de aderência diminui;
- O nível de ruído pode aumentar demasiadamente;
- A resistência ao rolamento aumenta bastante, elevando o consumo do combustível;
- O consumo de pneu eleva-se muito.

Esta problemática tem levado os pesquisadores a analisar faixas recomendáveis de textura superficial variando entre 0,8 e 1,3mm, tentando otimizar estas diferenças.

### 3.5. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE NO FENÔMENO DE ATRITO

Face ao exposto no item 3.4. avaliamos que para qualquer tipo de revestimento, há um sensível decréscimo do valor do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade, sendo esta redução mais significativa nos pavimentos molhados do que nos pavimentos secos. Nestes, ocorre uma redução inicial e, a partir de determinado valor de velocidade, ocorre um fenômeno inverso, ou seja, há um ligeiro aumento do coeficiente de atrito. Isto ocorre devido ao fenômeno da histerese, que aumenta com o acréscimo da velocidade. Desta forma, das parcelas que compõem o atrito para pequenas velocidades, a parcela preponderante é a adesão pneu/pavimento, a qual diminui com o aumento da velocidade.

Para altas velocidades, a histerese passa a comandar o valor final do coeficiente de atrito, que aumenta ligeiramente com a velocidade, ocorrendo assim, o aumento do coeficiente de atrito a partir de determinado valor de velocidade para pistas secas.

### 3.6. INFLUÊNCIA DA LÂMINA D'ÁGUA

A presença na superfície de pavimento, de lâmina d'água com espessuras de alguns milímetros, pode em determinadas condições da pista e dos pneus, provocar o fenômeno de hidroplanagem, em veículos que transitam com elevada velocidade.

A espessura da lâmina d'água é função da declividade transversal da pista, largura da pista, da rugosidade da superfície do pavimento e da intensidade da chuva, conseqüentemente o perfil da lâmina d'água é função da geometria e de alguns aspectos físicos da pista.

A hidroplanagem é caracterizada pela formação de uma camada contínua de água entre as superfícies do pneu e da pista. Seu mecanismo básico consiste na formação de uma pressão hidrodinâmica, devido à dificuldade de escoamento da lâmina de água, situada na frente do pneu. Esta pressão pode equilibrar a pressão exercida pelo pneu, deste modo, impedir o contato direto do pneu com a pista.

Quanto menor for a pressão do pneu e maior a velocidade do veículo, maior será a possibilidade de ocorrência do fenômeno. Embora normalmente, seja necessária uma lâmina de mais de 2,0 milímetros não são raras as condições que possibilitam o aparecimento do fenômeno com espessuras de apenas 1,0 a 2,0 mm.

Considerando que durante a hidroplanagem o coeficiente de atrito a que está sujeito o veículo atinge valores baixíssimos (0,05 ou mesmo 0,02), pode-se avaliar as graves conseqüências para sua estabilidade.

Com a superfície inundada, as ranhuras da banda de rodagem e os vazios da textura superficial do pavimento devem ser capazes de drenar uma quantidade de água da área de contato, de modo a permitir que ocorra contato pneu / pavimento. Com o aumento da velocidade do veículo, há um tempo de contato menor entre o pneu e o pavimento, ocorrendo

conseqüentemente, uma menor capacidade do sistema de drenar a água no tempo necessário, gerando então uma diminuição do coeficiente de atrito.

A espessura da lâmina de água diminui o coeficiente de atrito até uma espessura de aproximadamente 0,5mm estabilizando-se a partir desta espessura até atingir um determinado valor quando passa a ocorrer a acquaplanagem.

### 3.6.1. DETERMINAÇÃO DO PERFIL DA LÂMINA D'ÁGUA

A presença de uma pequena lâmina d'água na superfície dos pavimentos pode determinar problemas de redução de aderência pneu x pavimento, problemas de nuvens de água e problemas de jatos d'água. Todos estes problemas são prejudiciais ao trânsito de veículos.

As equações para determinar o perfil da lâmina d'água são as de Iwagaki, Keulegem e estudos experimentais de Izzard (11) que estabeleceram as seguintes relações:

$$V_w = \frac{K \cdot L \cdot (q \cdot x)}{43200}$$

$$\text{Onde: } K = \frac{0,0007 \cdot q + c}{i^{1/3}}$$

Sendo:

$V_w$  = volume retido na lâmina d'água em regime de equilíbrio, para uma faixa de largura unitária (pés cúbicos)

$K$  = coeficiente de retenção

$i$  = declividade (varia de 0,1% a 4%)

$L$  = comprimento total da lâmina (largura da pista) (pés)

$q$  = precipitação (polegadas por hora)

$x$  = distância da origem (pés)

$C$  = coeficiente que é função da rugosidade da superfície do pavimento

**Tabela 3.6.1. – Valores de C**

| <b>Tipo de rugosidade da Superfície</b>    | <b>Valores de C</b> |
|--|---------------------|
| Revestimento asfáltico de baixa rugosidade | 0,006 a 0,007       |
| Revestimento asfáltico de média rugosidade | 0,007 a 0,008       |
| Revestimento asfáltico de alta rugosidade  | 0,010 a 0,012       |
| Pavimento de concreto                      | 0,012               |

Os estudos em pista experimentais de Gallaway (8) e Ross (10) obtiveram, as seguintes equações para o cálculo da espessura da lâmina d'água:

#### Fórmula de Gallaway

$$d = 3,38 \cdot 10^{-2} \cdot (1/ht)^{-0,11} \cdot L^{0,43} \cdot I^{0,59} \cdot (1/S)^{0,42} - ht, \text{ sendo:}$$

d = altura média da LA acima da parte superior da textura do pavimento em polegadas;

ht = profundidade média da textura superficial, em polegadas;

L = extensão percorrida pela água, em pés;

I = intensidade de chuva em polegadas por hora;

S = declividade transversal em pés/pés.

#### Fórmula de Ross

$$d = 0,015 (L \cdot I)^{1/2} \cdot n^{1/S}, \text{ sendo:}$$

d = altura média da lâmina d'água, em cm;

L = extensão percorrida pela água no pavimento, em m;

I = intensidade de chuva em cm/h;

N = 1/S inverso da declividade transversal, em m/m.

Analisando estas equações observaremos que, os parâmetros obtidos experimentalmente por Gallaway (8) e Ross (10) são muito próximos. Pode-se concluir que, os parâmetros que têm grande influência na espessura da lâmina d'água são a intensidade de chuva, a extensão a ser percorrida pela água, a declividade transversal e a textura superficial.

### 3.7. DETERMINAÇÃO DA ADERÊNCIA

A aderência pneu x pavimento tem basicamente dois efeitos. Inicialmente permitir que um veículo conserve em todo momento a trajetória desejada pelo motorista, e de outro lado permitir que a frenagem se realize, com segurança, em tempo hábil.

A aderência de um pavimento pode ser medida de duas maneiras, transversalmente, através de um coeficiente de atrito transversal e, longitudinalmente, através de um coeficiente de atrito longitudinal. Em ambos os casos, procura-se com as medições de aderência, a definição de áreas potencialmente perigosas, pesquisas com revestimentos anti-derrapantes e avaliações da qualidade anti-derrapante com o tempo nas rodovias e aeroportos. No Brasil foi desenvolvido pelo Prof. Felipe Domingues um moderno equipamento medidor de aderência conhecido no meio técnico como Integrador IPR/USP.

### 3.7.1. – FATORES QUE INFLUENCIAM AS MEDIÇÕES DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

Entre os principais fatores podemos citar:

- As condições gerais da superfície;
- A velocidade do ensaio;
- A rugosidade da superfície;
- O tráfego;
- A natureza do revestimento;
- Fatores externos;
- Tipo de equipamento de medição;
- A temperatura;
- A espessura da lâmina d'água.

#### 3.7.1.1. – EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

O equipamento foi desenvolvido pelo NDTT/USP- Núcleo de Desenvolvimento Tecnológico de Transportes da EPUSP com o objetivo de efetuar medições do coeficiente de atrito longitudinal de uma rodovia, podendo também ser utilizado em aeroportos.

O equipamento é um reboque instrumentado, com duas rodas do tipo automóvel, puxado por veículo trator. As duas rodas tem uma separação correspondente a dos automóveis, para percorrer as chamadas trilhas das rodas de uma estrada. É utilizada uma suspensão de veículo em série de fabricação brasileira, com freios a disco.

O veículo trator deve ter a capacidade de arrastar o reboque durante o teste, sem perda sensível de velocidade, e suportar o peso da água armazenada.

O princípio de funcionamento do equipamento consiste no travamento rápido das rodas do reboque que é arrastado pelo veículo trator a uma velocidade constante, por dois segundos, com prévia regagem controlada do pavimento, numa espessura de 1,0mm.

Em cada operação do equipamento é utilizada a mesma quantidade de água, a qual é jogada na pista medida segundos antes da frenagem, a carreta possui um transdutor de forças, instalado entre a manga de eixo e a pinça de seu freio, de tal modo que, os esforços solicitados pela pinça, são transmitidos ao reboque por seu intermédio e captados por “stran – gages” que fornecem informações ao sistema eletrônico totalmente computadorizado do equipamento.

Para medir as velocidade é utilizados um sensor óptico instalado no cubo da roda da carreta, constituído por um disco óptico perfurado, e por um conjunto emissor-receptor de luz.

#### 4. – INFLUÊNCIA DA DRENAGEM SUPERFICIAL NA CAPACIDADE VIÁRIA

A presença de água na pista tem conseqüência direta, não somente na capacidade, mas principalmente na segurança da via.

A capacidade de tráfego de uma seção de uma via é função de numerosas variáveis, relacionadas às condições físicas da via, ao tráfego e ao meio ambiente. A capacidade é um volume horário, que nunca poderá ser excedido sem que se modifiquem as condições da via.

A seguir apresentamos uma abordagem teórica do fenômeno, tentando chegar a procedimentos que nos permitam avaliar a redução da capacidade viária em função da ocorrência de chuva.

#### 5. – ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM NA CAPACIDADE VIÁRIA

Os principais fatores que influenciam na capacidade viária, podem ser enquadrados nos seguintes itens:

##### 5.1. – FATORES FÍSICOS DA VIA

Os fatores físicos da via são aqueles relativos às características da via tais como: localização geográfica, largura de faixa, curvas horizontais e verticais, obstáculos laterais, condições do pavimento, alinhamento, greide, faixas auxiliares, acostamento, etc.

A seguir, passo a analisar resumidamente estes fatores:

**a) Largura da Faixa;**

As faixas mais estreitas tem menor capacidade, sob condições de fluxo contínuo, as faixas de 3,60m, aceita como o limite acima do qual a capacidade da via não sofre mais acréscimo.

**b) Asfaltamento lateral**

Obstruções laterais tais como: postes de sinais, postes de semáforos, carros estacionados, etc.; localizados à menos de 1,80m da margem da faixa de tráfego, reduzem consideravelmente a largura efetiva da faixa. Logo, os efeitos de largura de faixa e afastamento lateral são inter-relacionados.

**c) Acostamento**

Um veículo avariado sem local para refúgio, deverá parar na pista obstruindo uma faixa, conseqüentemente reduzirá a velocidade das faixas adjacentes.

**d) Faixas auxiliares**

É a porção de rodovia adjacente à via diretamente percorrida usada para estacionamento, mudança de velocidade, conversão e armazenagem, em seção de entrelaçamento, para caminhões e ultrapassagem.

**e) Condições de Superfície**

Uma pavimentação deteriorada e mal conservada afeta adversamente o nível de serviço em termos de capacidade, conforto e segurança.

**f) Alinhamento e greide**

Para o estudo da influência do alinhamento na capacidade devemos considerar a distância de visibilidade (de frenagem e ultrapassagem). Os caminhões com suas cargas normais andam a velocidades menores em aclives, principalmente se o aclive for longo e íngreme.

## **5.2. – FATORES DE TRÁFEGO**

Os fatores de tráfego são aqueles relativos ao sub-sistema motorista-veículo e incluem a composição da corrente de tráfego, características dos motoristas, distribuição dos veículos por faixa, variações no fluxo de tráfego, interrupções do tráfego, interrupções em greide, características do veículo, condições de regulagem, entre outros.

Conforme HCM (9) vias de características geométricas idênticas, podem apresentar diferentes capacidades, pois é influenciada também pela composição, hábitos e desejos do tráfego que a utiliza.

A seguir analisamos resumidamente estes fatores:

**a) Caminhões**

São veículos para transporte de carga que reduzem a capacidade de uma via. Sua influência na corrente de tráfego é medida em termos de equivalência em carros de passageiros.

**b) Distribuição dos veículos por faixa**

Em vias de várias faixas de tráfego, nem todas as faixas possuem o mesmo volume de tráfego. Os volumes de serviço a uma dada velocidade, em uma via de várias faixas, tendem a diminuir quando o controle de acesso não existe ou é parcial e os veículos entram livremente em ambos os lados da via.

**c) Variações no fluxo de tráfego**

A variação do tráfego influencia a capacidade e é expressa em termos de fator de pico horário, que é a razão do volume que ocorre durante a hora de pico, pela máxima razão de fluxo ocorrido durante um período de tempo dado, dentro da hora de pico.

### 5.3. – DISTÚRBIOS NO MEIO AMBIENTE

Em relação aos distúrbios do meio ambiente que influenciam na capacidade, podemos incluir a intensidade de iluminação, a presença de chuva, neblina, neve ou gelo. Estes fatores não podem ser controlados pelo homem nem a maioria dos seus efeitos podem ser compensados pela preparação anterior à suas ocorrências. Em relação a estes fatores, pouca coisa pode ser feita pelo homem. Apenas alguns procedimentos, como por exemplo: iluminação noturna, drenagem eficiente, entre outros, podem ser adotados para minimizar alguns de seus efeitos na capacidade viária.

## 6. – CARACTERIZAÇÃO DOS EFEITOS DA CHUVA NA PISTA E NO TRÁFEGO

### 6.1. – CONSEQUÊNCIAS DO EFEITO DA CHUVA NA CIRCULAÇÃO VIÁRIA

Os efeitos ocasionados pela chuva produzem diversas conseqüências na circulação dos veículos, a seguir relacionados:

#### a) Redução da largura da faixa de rolamento

Quando a largura molhada, decorrente do fluxo d'água, nas sarjetas ou sarjetões, invade a faixa de rolamento, ocorre uma redução efetiva da largura da faixa de rolamento, levando-se em consideração, que os usuários tenderão a não trafegar na(s) faixa(s) inundada(s), reduzindo a largura da faixa utilizável pelo tráfego.

#### b) Redução da aderência pneu/pavimento

A redução da aderência pneu/pavimento pode ter duas conseqüências, quais sejam:

- Redução da velocidade de operação;
- Aumento do espaçamento entre veículos em função do aumento da distância de parada.

A AASHTO (1) considerava até 1984, que havia uma redução da velocidade média de operação, em função da condição de pista molhada. Estudos anteriores mostraram estatisticamente, a redução da velocidade média de operação em pistas molhadas, para a velocidade de projeto especificada. Em vista disto, a AASHTO passou a adotar, para o cálculo da distância de parada, a velocidade diretriz estabelecida, ao invés de efetuar redução na velocidade em função da condição de pista molhada.

Desta forma a condição crítica na circulação, diz respeito ao aumento do espaçamento entre veículos, função do aumento da distância de parada, decorrente da redução do coeficiente de aderência. No cálculo da distância de visibilidade de parada, temos a seguinte equação:



$$d = V \cdot Tr + \frac{V^2}{2 \cdot g (f + i)}$$

sendo:

d = distância de parada em m;

Tr = tempo de reação em seg.;

V = Velocidade em m/s;

f = coeficiente de aderência pneu/pavimento;

i = rampa em mm

Com a redução de “P” ocorre um aumento da distância de parada e, conseqüentemente, os motoristas tendem a aumentar o espaçamento entre veículos.

### c) **Redução da visibilidade**

A redução da visibilidade, por qualquer das causas citadas no item anterior, induz também o motorista a diminuir a velocidade ou aumentar o espaçamento entre veículos.

Estudos realizados nos Estados Unidos demonstraram não haver redução sensível na velocidade média de operação, em função da chuva. Existe um acréscimo natural, no espaçamento decorrente da redução de visibilidade, que influi, entre outros fatores, no aumento do tempo de reação do motorista.

## **7. – CARACTERIZAÇÃO DOS EFEITOS DA CHUVA NA CAPACIDADE E SUAS CONSEQUÊNCIAS**

A condição da superfície do pavimento e as condições ambientais exercem certa influência na capacidade viária. O HCM não leva em consideração tais fatores na análise da capacidade, pelo fato de não dispor de estudos que permitem o cálculo desta correção.

Com relação às condições de superfície de rolamento, são descritas em (9) para o cálculo do tráfego, levando em consideração tal fator.

Em relação às condições ambientais, os estudos existentes (8) não são absolutamente gerais e não permitem extrapolações para outras situações.

### **7.1. – CONSEQUÊNCIAS EM RELAÇÃO À REDUÇÃO DA SEÇÃO DA VIA.**

Em relação à redução da capacidade viária, os procedimentos indicados no HCM-85 (9) permitem avaliar a capacidade da via, considerando que a redução da largura devido a presença de água na pista, influi no cálculo dos parâmetros “N” e “f<sub>w</sub>”, citados anteriormente. Apenas falta levar em consideração o efeito da onda de choque que a redução da largura de uma seção de via ocasionaria.

## 7.2. – CONSEQUÊNCIAS EM RELAÇÃO A REDUÇÃO DA VELOCIDADE E AUMENTO DO ESPAÇAMENTO ENTRE VEÍCULOS

A presença de uma determinada espessura de lâmina d'água, sobre um pavimento, representa uma redução na aderência pneu/pavimento, aumentando conseqüentemente a distância de parada dos veículos.

Alguns estudos (2) analisaram a variação do coeficiente de aderência com a espessura de lâmina d'água, a qual pode ser determinada, conforme item 3.6.1.

O coeficiente de aderência varia em função da velocidade do veículo, para várias situações de pneus e da pista. A variação das relações de aderência x LA x Velocidade x Espaçamento são muito amplas, não permitindo no presente trabalho, a elaboração de equações que correlacionem tais parâmetros.

A análise do HCM-85 (9) nos permite afirmar que a máxima capacidade teórica de uma via expressa é de 2000 ucp/faixa, e que esta capacidade se verifica quando a velocidade é de 48 km/h, o que representa um espaçamento de 24m/veíc. Considerou-se ainda que esta capacidade é obtida em condições ideais, ou seja, pista seca.

Analisando a equação de cálculo da distância de parada, temos:

$$d = 0,7 \cdot V + \frac{V^2}{225 \cdot f}$$

Para uma redução do coeficiente de aderência de  $f_1$  para  $f_2$ , mantida a mesma velocidade, teremos:

$$\Delta d = 0,7 \cdot V + (V^2 / 255 \cdot f_2) - [0,7 \cdot V + (V^2 / 255 \cdot f_1)]$$

$$\Delta d = (V^2 / 255) \cdot (1 / f_2 - 1 / f_1)$$

Se admitirmos que na condição de pista molhada, os usuários elevem o espaçamento médio do parâmetro "d", teríamos assim calculado o novo valor do espaçamento e, conseqüentemente o novo valor da capacidade.

Face ao acima exposto, a abordagem teórica depende de medições práticas para avaliação da sua aplicabilidade e limitações. Os estudos disponíveis sobre redução de capacidade com a presença de chuva, não fizeram qualquer análise do coeficiente de aderência da pista.

Porém, esta análise é válida para caracterizar a ordem de grandeza da redução, que pode ocorrer na capacidade de tráfego de uma via, em função da redução da aderência.

## 7.3. – CONSEQUÊNCIAS EM RELAÇÃO A DIMINUIÇÃO DA VISIBILIDADE

Em termos de redução de visibilidade, podemos caracterizar este efeito, através da redução percentual da visibilidade proporcionada pela presença de água de chuva no parabrisa, aliada à presença de gotas de chuva, caindo à frente do veículo e à redução da intensidade luminosa.

## 8. – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dos estudos realizados neste trabalho destacamos algumas conclusões importantes, as quais são apresentadas a seguir:

- a) O projeto geométrico de uma via é um componente das dificuldades de drenagem das superestruturas dos pavimentos em vista que os pavimentos rodoviários têm grandes áreas expostas as ações das intempéries, grandes áreas expostas a infiltração de água de várias fontes e somente pequenas áreas através das quais a água pode drenar. Conseqüentemente as largas rodovias de múltiplas faixas de tráfego estão provando ser muito mais difíceis de drenar que as antigas rodovias, mais estreitas.

Assim, a porcentagem de declividade transversal da rodovia deverá ser diretamente proporcional a intensidade pluviométrica da região atendida pela rodovia. Desta maneira, a água pluvial atingirá rapidamente os dispositivos de captação, de condução e de dissipação de energia. Finalmente a água escoará através de caixas coletoras de concreto até seu lançamento nos bueiros de concreto ou aço corrugado. Por outro lado o alinhamento horizontal e vertical da rodovia deverá atender a critérios técnicos que evitem o acúmulo prolongado de água livre na superestrutura do pavimento. Assim, o excesso de água deve ser rapidamente drenado.

- b) A preocupação quanto à segurança do tráfego deve ser um dos principais parâmetros a ser considerado quando da fixação das características do projeto a ser desenvolvido para as rodovias a serem futuramente construídas. Assim, é importante escolher o melhor tipo de revestimento para cada pavimento, sob a óptica da aderência. Por outro lado, recomenda-se pesquisar com mais profundidade o inter-relacionamento entre a rugosidade do pavimento e a formação de nuvem d'água.

Todo pavimento nasce rugoso ou irregular, o valor dessa irregularidade deve ser o menor possível para o pavimento poder iniciar a sua vida de serviço com um máximo de potencial de serventia. A irregularidade inicial do revestimento é função do acabamento da base e da própria impossibilidade prática de o acabamento do revestimento ser perfeito. O aumento da deformação permanente do revestimento deve ser lento, conseqüentemente é lenta a evolução da irregularidade ao longo do tempo.

- c) A drenagem superficial deficiente é um dos fatores que contribui para ocasionar acidentes devido à ocorrência de chuva intensa. Outros fatores contribuem simultaneamente para o evento, tais como: imperícia ao conduzir o veículo com chuva, imprudência por dirigir com excesso de velocidade, perda da aderência pneu-pavimento ocasionando o deslizamento do veículo, pista derrapante, sinalização encoberta, etc. Assim, recomenda-se que as condições de conservação e manutenção da via sejam periódicas visando principalmente desobstruir os dispositivos de drenagem (captação, condução e lançamento). Por outro lado, as condições geométricas, longitudinais e transversais devem facilitar o rápido escoamento das águas pluviais.

- d) Recomenda-se não dirigir com excesso de velocidade em pistas molhadas, face ao acentuado decréscimo do coeficiente de atrito com a velocidade, podendo ocorrer a

derrapagem. Logo, é essencial que o revestimento do pavimento conserve sua resistência à derrapagem em alta velocidade. Revestimento com forte rugosidade apresenta menor redução do coeficiente de atrito com a velocidade. Assim, observamos que o coeficiente de aderência longitudinal diminui com o aumento da espessura da lâmina d'água, tanto mais rapidamente quanto mais fina é a textura superficial do pavimento flexível.

- e) A ocorrência da hidroplanagem com lâminas d'água de espessura maior ou igual a 2,0mm deve ser evitada o máximo possível, por ser a causa principal da redução drástica da aderência pneu/pavimento. Assim a lâmina d'água deve ser eliminada rapidamente da área de contato pneu x pavimento, quer seja através da declividade transversal e/ou da macrorugosidade do pavimento ou através da escultura do pneu. Logo, é de vital importância o aumento da área de contato através da evacuação rápida do ressalto d'água que se forma à frente do pneu.
- f) Com relação a escultura dos pneus observamos que os revestimento betuminosos finos são mais sensíveis a profundidade dos sulcos dos pneus devido a má drenagem superficial oferecida pelo revestimento. Assim, pneus com mais de 50% de desgaste não deveriam ser usados em pistas molhadas com altas velocidades. Recomenda-se que utilizemos revestimentos betuminosos graúdos, pois oferecem aderência em torno de 3 vezes superior a do revestimento fino. Por outro lado, os pneus radiais oferecem coeficiente de aderência transversal 30% superior a dos pneus tipo diagonal, conseqüentemente o caso mais perigoso e desfavorável será o do pneu diagonal liso sobre revestimento fino.
- g) A influência do ligante no revestimento asfáltico se faz sentir segundo sua natureza e sua dosagem. Deve-se evitar excesso de ligante no revestimento, visando evitar superfícies mais lisas e portanto, mais escorregadia. Convém ressaltar que quanto mais lisa é a superfície do pavimento, a pista se torna mais derrapante.
- h) Na via urbana, a ocorrência de chuvas intensas, contribui para a redução da capacidade da via e seus conseqüentes congestionamentos. Fato agravado mais ainda, com a falta de limpeza e conservação dos dispositivos de drenagem nas grandes metrópoles brasileiras. Recomenda-se que sejam realizados estudos estatísticos que correlacionem a capacidade viária em pista seca e em pista molhada visando avaliar objetivamente os efeitos da chuva na pista. É de vital importância garantir na via urbana boas condições de tráfego e segurança do usuário durante todo o tempo.

## **9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 – AASHTO. A policy on geometric design of highway and streets. Washington D.C, 1984
- 2– ANDREATINI. L.P.V. Determinação da espessura da lâmina d'água devida à precipitação pluvial na superfície de pavimentos. Anais da 21ª RAPv. Vol.1. p. 89-74. Salvador. ABPV 1986
- 3– CEDERGREN, HARRY. Drenagem dos Pavimentos de Rodovias e Aeródromos, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro. 1987
- 4 – CETESB – Drenagem Urbana: manual de Projetos – S.P. 1979
- 5– CHOW.VEN TE. Hydrologic design of Culverts, Journal of theHydraulics Division. ASCE. Vol. 88 nº. HY 2, March 1966
- 6– MICHELIN. R.G. – Drenagem Superficial e Subterrânea de estradas. Multilibri Ltda. 2ª ed. P. Alegre, 1975
- 7 – WILKEN, P. Sampaio – Engenharia de Drenagem Superficial, CETESB, SP, 1978
- 8 – GALLAWAY B.M. – The relative effects of several factors affacting rain water depths on pavement surfaces – HRB 396. Washington D.C, 1972
- 9 – HRB – Highway Capacity Manual – Special Report 209, 1985
- 10-ROSS N.F. – The depth of rain water on road surfaces – RRL Report LR 236, 1973
- 11-IZZARD, C.F – Hydraulics of Runoff from developed surfaces, HRB 126. Washington D.C.,1970.