

# **INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE PLUVIOMÉTRICA NAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA EM VIAS DE MÚLTIPLAS FAIXAS**

**Felipe Issa Kabbach Junior**

**Carlos Yukio Suzuki**

Planservi Engenharia Ltda.

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**Leandro Cardoso Trentin**

Planservi Engenharia Ltda.

Universidade Paulista

**Marcos Akira Shinzato**

Planservi Engenharia Ltda.

## **RESUMO**

Atualmente os projetos geométricos no Brasil são elaborados com uma declividade transversal na tangente de 2%, independente do número de faixas de rolamento. Porém, é sempre uma preocupação a ocorrência de hidroplanagem nos veículos nas rodovias com mais de três de faixas por sentido. Neste estudo foram analisados os principais métodos relacionados com o efeito de hidroplanagem de veículos em função da intensidade pluviométrica e das características geométricas da via. Complementando o estudo, são apresentados os efeitos da diminuição da visibilidade para certa intensidade pluviométrica e velocidade. Para estudo de caso, foi escolhida a seção transversal de uma rodovia com três faixas de tráfego por sentido, e o impacto nas condições da segurança viária em uma futura ampliação para quatro faixas de tráfego. Conclui-se que a declividade transversal recomendada para atender a mesma intensidade pluviométrica é de 3%.

## **ABSTRACT**

The geometric design in Brazil is currently elaborated with a 2% transversal declivity in tangent, regardless of the number of lanes. However, hydroplaning is always a matter of concern on highways with more than three lanes per way. This study analyzes the main methods that deal with the phenomenon of tire hydroplaning in relation to rainfall intensity and geometric characteristics. This study is complemented by a discussion of the effect of reduced visibility due to rainfall intensity and speed. The case study presented consists of a cross slope on a three-lane highway and the impact a future expansion to four lanes of traffic will have on road safety conditions. Concluded that the cross slope recommended to meet the same intensity rainfall is 3%.

## **1. INTRODUÇÃO**

A água da chuva precipitada sobre a superfície do pavimento tende a escoar para o ponto mais baixo da seção transversal, formando um filme laminar de espessura variável.

Dependendo das condições de escoamento em função da intensidade pluviométrica e das características físicas e geométricas da superfície de rolamento, essa lâmina d'água pode oferecer riscos aos motoristas quanto à segurança devido à redução de visibilidade e diminuição do atrito pneu / pavimento sob condição de pista molhada.

O objetivo do presente trabalho é analisar dentre os modelos existentes quais os fatores mais importantes que influem na espessura de escoamento da lâmina d'água e verificar qual o valor crítico a partir do qual é possível aumentar os riscos de acidentes devido aos fenômenos da hidroplanagem, de derrapagem e a falta de visibilidade pela formação de spray e névoa de gotículas d'água na frente do veículo.

A drenagem superficial tem por objetivo escoar o mais rápido possível a água da plataforma viária e o estudo da espessura da lâmina d'água se torna importante para as rodovias de múltiplas faixas por sentido, quando esse valor pode ser elevado nas imediações das faixas mais externas.

No Brasil, o valor mínimo usualmente adotado para a declividade transversal é de 2% para pavimentos betuminosos de elevada qualidade e de 1,5% para pavimentos de concreto de cimento Portland. Para pistas que apresentam revestimento com maior grau de porosidade ou onde seja possível a ocorrência de recalques diferenciais da plataforma, situações aceitáveis apenas para vias de classes de projeto inferiores, tem sido adotada declividade transversal mínima de 2,5% a, no máximo, 3%. Também no caso de pistas com caimento único e mais de duas faixas, poderá ser conveniente, por motivos de drenagem, adotar declividade transversal superior a 2%.

O estudo de caso tem por objetivo verificar a necessidade de se alterar a declividade transversal de 2% da pista em tangente em via de múltiplas faixas para se acomodar novas faixas adicionais de rolamento na plataforma viária. Essa dúvida se manifesta em vista da perspectiva de se aumentar por ocasião das chuvas intensas a espessura da lâmina d'água sobre a superfície do pavimento, devido ao maior percurso da trajetória do fluxo de escoamento na plataforma e, por conseguinte maior possibilidade da ocorrência do fenômeno da hidroplanagem.

## **2. REVISÃO DOS ESTUDOS EXISTENTES**

A questão da segurança viária sob condição de tráfego de veículos em pista molhada é relativamente antiga e os primeiros modelos empíricos para se estimar a profundidade da lâmina d'água foram estudados a mais de 40 anos.

O sistema de drenagem superficial da plataforma é essencial para manutenção do pavimento e das condições de segurança do tráfego.

O excesso de água na superfície do pavimento pode eventualmente causar interrupção do tráfego, reduzir a resistência à derrapagem aumentando o potencial da hidroplanagem, reduzir a visibilidade devido à névoa e ao "spray", bem como causar dificuldade na dirigibilidade quando as rodas dianteiras do veículo atingem poças d'água.

A hidroplanagem é um fenômeno diferente da derrapagem, que ocorre quando os pneus perdem totalmente contato com o pavimento e começam a rodar sobre um pequeno filme de água. A partir desse momento, qualquer aceleração, frenagem ou outras forças de deslocamento podem proporcionar descontrole total do veículo ao motorista.

O escoamento da água superficial proveniente da chuva pelo pavimento é dependente de uma combinação de fatores, tais como: o perfil longitudinal; declividade transversal; largura da pista; textura; e grau de conservação da superfície e intensidade pluviométrica.

As declividades transversais mínimas recomendadas por diversos órgãos rodoviários a partir de experiências locais que garantem aceitáveis níveis de conforto e segurança foram apresentadas no capítulo anterior.

Apresentam-se a seguir de maneira resumida alguns dos principais modelos analisados para determinação do efeito de hidroplanagem.

## 2.1. Modelo de determinação da velocidade de hidroplanagem

A seguir são apresentados os principais estudos sobre a determinação da velocidade em que ocorre o efeito de hidroplanagem para veículos de passeio e caminhões.

### 2.1.1 Método de Gallaway *et al.*

O principal método de determinação da velocidade para ocorrer a hidroplanagem a partir da espessura da lâmina d'água é baseado nos estudos de Gallaway *et al.* (1979), que acaba sendo preconizado nos principais manuais. Porém, este método é dividido em duas equações, uma para espessuras de lâmina d'água menores ou iguais a 2,4 mm:

$$V = 96,9 \cdot d^{-0,259} \quad (1)$$

em que,  $V$  = velocidade em que ocorre a hidroplanagem [km/h]; e  
 $d$  = espessura da lâmina d'água [mm].

E, outra equação para espessuras de lâmina d'água maiores que 2,4mm:

$$V = 0,9143 \cdot SD^{0,04} \cdot Pt^{0,3} \cdot (TD + 0,794)^{0,06} \cdot A \quad (2)$$

Sendo,  $A$  o maior valor calculado a partir das seguintes equações:

$$A = \left[ \frac{12,639}{d^{0,06}} + 3,507 \right] \quad (3)$$

ou

$$A = \left[ \frac{22,351}{d^{0,06}} - 4,97 \right] * TXD^{0,14} \quad (4)$$

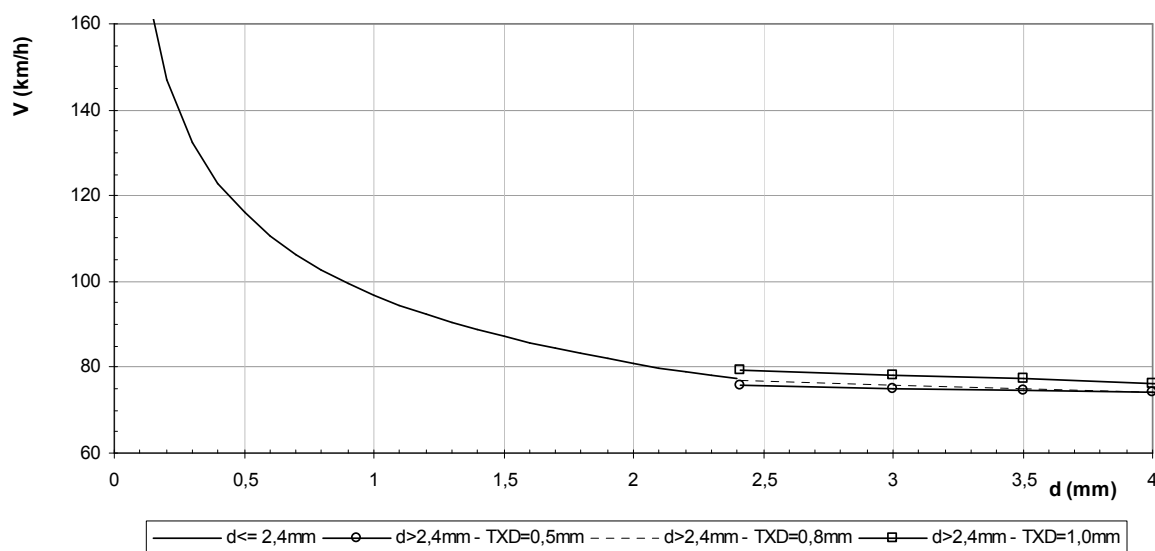
em que,  $V$  = velocidade do veículo [km/h];  
 $TD$  = profundidade do sulco do pneu [mm];  
 $Pt$  = pressão de enchimento do pneu [kPa];  
 $SD$  = *spindown*, ou seja, perda de aderência [%];  
 $d$  = espessura da lâmina d'água [mm]; e  
 $TXD$  = espessura da textura do pavimento [mm].

Neste método, a hidroplanagem é assumida quando ocorrem 10% da perda de aderência ( $SD$ ), ou seja, quando é necessário rotacionar 1,1 vezes a circunferência da roda para percorrer uma distância igual a uma circunferência.

$$SD = \frac{Wd - Ww}{Wd} \cdot 100 \quad (5)$$

em que,  $Wd$  = rotação da roda no pavimento seco; e  
 $Ww$  = rotação da roda no pavimento molhado.

Na Figura 1 são apresentadas as equações 1 e 2 de Gallaway *et al.* (1979), onde é possível determinar a espessura da lâmina d'água que pode causar o fenômeno da hidroplanagem, em função da velocidade de projeto e variando a textura do pavimento de no mínimo 0,5 mm a, no máximo 1,0 mm. Na elaboração da Figura 1, foram adotados os valores para a pressão dos pneus igual a 176 kPa e a profundidade dos sulcos de 1 mm.



**Figura 1:** Espessura da lamina de água em função da velocidade

### 2.1.2 Modelo para hidroplanagem de caminhões

A NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) publicou os estudos de Horne, W e Dreher, R (1963), em que apresentam uma equação para determinar a velocidade em que ocorre o efeito da hidroplanagem em aeronaves. Esta fórmula é utilizada para determinar a velocidade em função da pressão do pneu, independente da espessura da lâmina d'água.

$$V = 6,34\sqrt{P_t} \quad (6)$$

em que,  $V$  = velocidade em que ocorre a hidroplanagem [km/h]; e

$P_t$  = pressão de enchimento do pneu [kPa].

Porém, na década de 80, estudos de Horne *et al.* (1986) e engenheiros do TTI (*Texas Transportation Institute*) questionaram a possibilidade de ocorrer o efeito de hidroplanagem em caminhões não carregados, e acabou resultando em uma relação da velocidade e a forma de contato entre o pavimento e pneu, que resultou nas Equações 7 e 8, baseadas nos estudos de Horne *et al.* (1986) e do TTI *apud* Gallaway (2009), respectivamente.

$$V = 4,87 \sqrt{P_t \cdot \frac{1}{W/L}} \quad (7)$$

$$V = 25 \cdot P_t^{0,21} \sqrt{\frac{1,4}{W/L}} \quad (8)$$

em que,  $V$  = velocidade em que ocorre a hidroplanagem [km/h];

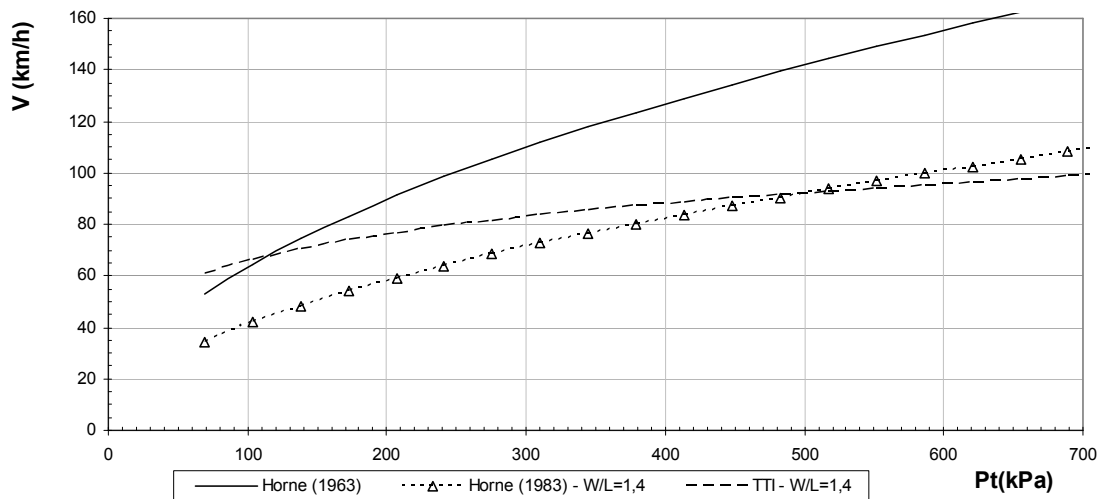
$P_t$  = pressão de enchimento do pneu [kPa];

$P_t$  = pressão de enchimento do pneu [kPa];

$W/L$  = forma de contato entre pavimento / pneu, sendo  $W$  a largura e  $L$  o comprimento da marca do pneu sobre o pavimento.

Diferente dos pneus aeronáuticos em que a forma de contato entre o pavimento e pneu (W/L) em condições operacionais é constante, uma vez que os fabricantes impõem que a pressão / carga devam ser ajustadas para o pneu apresentar uma deflexão constante, os pneus rodoviários em veículos comerciais apresentam uma grande variação na forma de contato.

Na Figura 2 é ilustrada a velocidade para que ocorra a hidroplanagem em caminhões não carregados, em função da pressão dos pneus e a forma de contato entre o pneu e pavimento, baseado nos estudos da NASA (1963), Horne *et al.* (1986) e do TTI *apud* Gallaway (2009).



**Figura 2:** Velocidade de hidroplanagem em função da pressão do pneu

## 2.2. Modelo de determinação da espessura de lâmina d'água para hidroplanagem

A espessura da lâmina d'água sobre a superfície do pavimento depende da intensidade pluviométrica, da extensão e declividade da trajetória d'água, e da textura do pavimento. A linha de maior declive a ser percorrida pela água é função da largura da pista de rolamento e das declividades transversal e longitudinal da plataforma.

### 2.2.1. Método Empírico do Road Research Laboratory (RRL)

Nos estudos do British Road Research Laboratory (RRL), a espessura do filme d'água para provocar o efeito de hidroplanagem é calculada a partir da seguinte equação baseada no NASSRA "Report of an Investigation into the Drainage of Wide Flat Pavements" (1974) e RRL Ministry of Transport Report No. LR 236 (1968). Cabe ressaltar, que a equação considera apenas as características geométricas da via.

$$d = 0,046 \frac{(L_f \cdot I)^{0,5}}{S^{0,2}} \quad (9)$$

em que,  $d$  = espessura da lâmina d'água sobre a textura do pavimento [mm];  
 $I$  = intensidade pluviométrica [mm/h];  
 $S$  = declividade da trajetória do fluxo [mm/mm]; e  
 $L_f$  = largura da trajetória do fluxo [m].

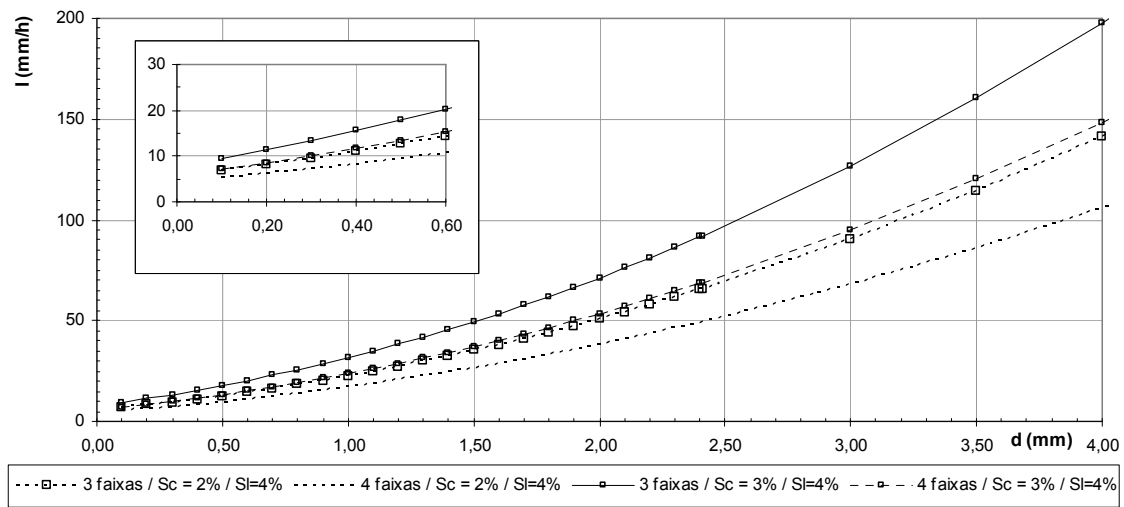
Sendo,

$$S = \sqrt{S_L^2 + S_T^2} \quad (10)$$

$$L_f = L \frac{S}{S_T} \quad (11)$$

em que,  $S_L$  = declividade longitudinal [mm/mm];  
 $S_T$  = declividade transversal [mm/mm]; e  
 $L$  = largura da pista de rolamento [m].

Neste método a espessura da lâmina d'água é determinada sobre o topo da superfície do pavimento, sem considerar a espessura média da textura. Portanto, para elaborar a Figura 3 a lâmina d'água foi acrescida com a espessura da textura do pavimento de 1 mm.



**Figura 3:** Espessura da lamina de água em função intensidade pluviométrica (RRL)

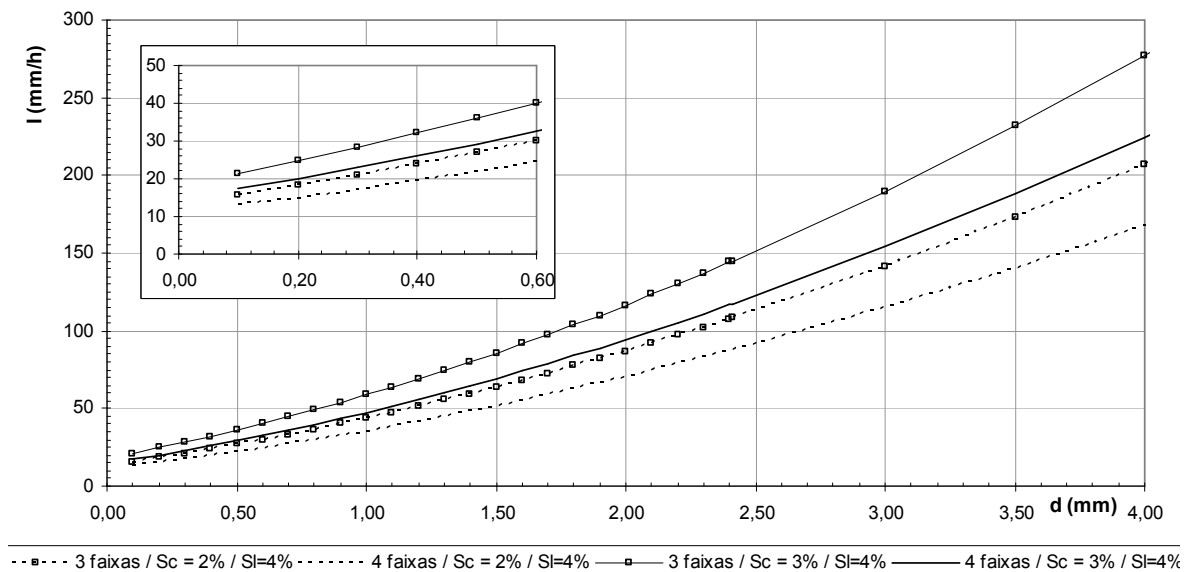
### 2.2.2. Método do Departamento de Transporte do Texas – USA

Neste procedimento empírico desenvolvido por Gallaway *et al.* (1971), a espessura da lâmina d'água é calculada a partir da intensidade pluviométrica, textura do pavimento e características geométricas da via, conforme a seguinte equação:

$$d = 0,01485 \left[ TXD^{0,11} L_f^{0,43} I^{0,59} \left( \frac{1}{S_T} \right)^{0,42} \right] - TXD \quad (12)$$

em que,  $d$  = espessura da lâmina d'água [mm];  
 $I$  = intensidade pluviométrica [mm/h];  
 $S_T$  = declividade transversal [mm/mm];  
 $L_f$  = largura da trajetória do fluxo [m]; e  
 $TXD$  = espessura da textura do pavimento [mm].

Na Figura 4, é apresentada a intensidade pluviométrica para ocorrer hidroplanagem em função da espessura da lâmina d'água, número de faixas de rolamento e declividades transversal e longitudinal, baseado dos estudos de Gallaway *et al.* (1971). Para haver compatibilidade entre as figuras, foi considerada uma espessura da textura do pavimento igual a 1 mm.



**Figura 4:** Espessura da lamina de água em função intensidade pluviométrica (Galloway)

### 2.3. Modelo analítico para determinação da espessura de lâmina d'água para hidroplanagem

O modelo analítico de determinação da espessura de lâmina d'água se baseia nas teorias de Manning, que conta com o efeito hidráulico da rugosidade da superfície e o método racional. Portanto, a intensidade pluviométrica é obtida pela seguinte equação:

$$I = \left( \frac{35,7367}{C \cdot n} \right) \cdot \left[ \frac{S_T}{(S_T^2 + S_L^2)^{0,25}} \right] \left( \frac{d^{1,67}}{L} \right) \quad (13)$$

em que, I = intensidade pluviométrica [mm/h];  
 $S_L$  = declividade longitudinal [mm/mm];  
 $S_T$  = declividade transversal [mm/mm];  
d = espessura da lâmina d'água [mm];  
n = coeficiente de rugosidade Manning;  
L = largura da pista de rolamento [m]; e  
C = coeficiente de escoamento do pavimento [0,70 à 0,95].

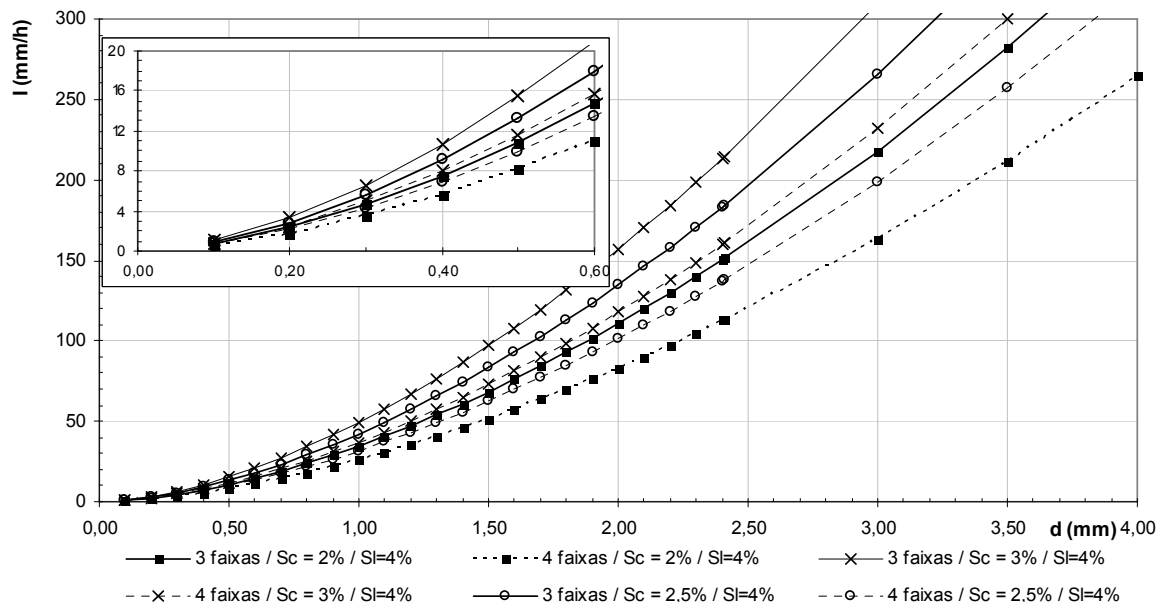
Na Tabela 1 são apresentados os valores sugeridos para o coeficiente de rugosidade para os tipos de pavimento e rugosidade da superfície.

**Tabela 1:** Valores do coeficiente de rugosidade de Manning

Tipo de revestimento	Nível de rugosidade	c
asfáltico	baixa	0,006 – 0,007
asfáltico	média	0,007 – 0,008
asfáltico	alta	0,010 – 0,012
concreto de cimento portland	-	0,012

Fonte: Gallaway, B. M. e Rose, J. G. (1971)

Utilizando a equação 13, com os coeficientes de rugosidade e escoamento do pavimento iguais a 0,010 e 0,90, respectivamente, foi elaborada a Figura 5 para determinação da intensidade pluviométrica em função da espessura de lâmina d'água para rodovias com duas ou três faixas de tráfego com a declividade transversal variando de 2% até 3%.



**Figura 5:** Espessura da lamina de água em função intensidade pluviométrica

#### 2.4. Modelo de Determinação da Distância de Visibilidade

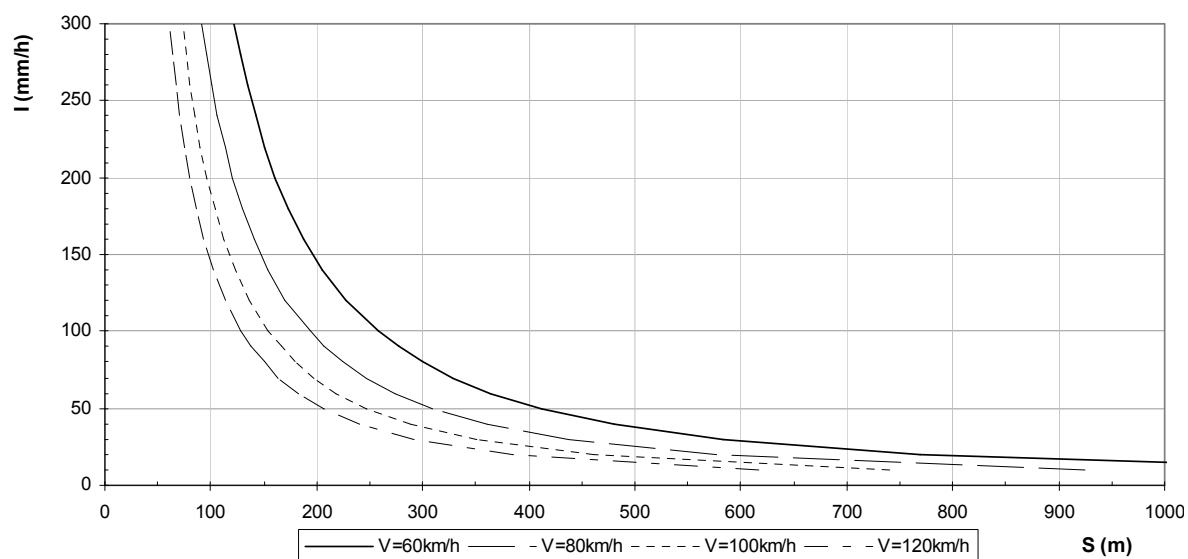
Para determinar a distância de visibilidade durante a chuva, o principal método é o exposto por Ivey *et al* (1975), onde a equação empírica apresenta a distância de visibilidade que é calculada em função da velocidade e a intensidade pluviométrica da chuva.

$$S_v = \frac{354030,6}{I^{0,68} \cdot V} \quad (14)$$

em que,  $S_v$  = distância de visibilidade [m];  
 $I$  = intensidade pluviométrica [mm/h]; e  
 $V$  = velocidade [km/h].

Na Figura 6 é apresentada a distância de visibilidade em função da intensidade pluviométrica e a velocidade da via.





**Figura 6:** Distância de Visibilidade em função da intensidade pluviométrica

A Tabela 2 a seguir, extraída do manual da AASHTO (2001), são apresentados os valores de distância de visibilidade de decisão para algumas manobras específicas com seus respectivos tempos de percepção e reação, e pode ser considerada uma referência básica para a avaliação deste parâmetro.

**Tabela 2:** Distâncias de Visibilidade de Decisão (m)

Velocidade de projeto (km/h)	A	B	C	D	E
50	70	155	145	170	195
60	95	195	170	205	235
70	115	235	200	235	275
80	140	280	230	270	315
90	170	325	270	315	360
100	200	370	315	355	400
110	235	420	330	380	430
120	265	470	360	415	470
130*	305	525	390	450	510

(\*) valor excepcional aceitável para condições de relevo extremamente favoráveis

Nota: Manobra A – Parada em via rural ( $t = 3,0$  s)

Manobra B – Parada em via urbana ( $t = 9,1$  s)

Manobra C – Mudança de velocidade/trajetória/direção em via rural ( $t$  varia entre 10,2 s e 11,2 s)

Manobra D – Mudança de velocidade/trajetória/direção em via suburbana ( $t$  varia entre 12,1 s e 12,9 s)

Manobra E – Mudança de velocidade/trajetória/direção em via urbana ( $t$  varia entre 14,0 s e 14,5 s)

Fonte: AASHTO (2001)

Portanto, para analisar a distância de visibilidade calculada pela equação 14 (Figura 6) em rodovias rurais, o valor encontrado é comparado com os valores da manobra A da Tabela 2.

### 3. ESTUDO DE CASO

O presente estudo tem por objetivo verificar a necessidade de se alterar a declividade transversal de 2% da pista em tangente constituída de 3 faixas de tráfego por sentido, para acomodar uma ampliação para quatro faixas de rolamento por sentido em rodovias rurais de múltiplas faixas.

Para elaboração da Tabela 3, foi adotada a variação da velocidade de projeto no intervalo de 80 km/h até 110 km/h, onde foram calculadas as espessuras de lâmina d'água crítica para cada velocidade com o modelo da Equação 1 de Gallaway *et al.* (1979).

Utilizando as espessuras críticas de lâmina d'água e o modelo analítico da Equação 13, foi possível determinar as intensidades pluviométricas para cada largura de pista e declividade transversal. Para a declividade longitudinal da rodovia foi adotado o valor máximo de 4%.

**Tabela 3:** Intensidade Pluviométrica do Estudo de Caso

Velocidade (km/h)	Espessura de Lâmina d'água (mm)	Intensidade Pluviométrica (mm/h)			
		3 faixas	4 faixas		
		$S_T = 2,0\%$	$S_T = 2,0\%$	$S_T = 2,5\%$	$S_T = 3,0\%$
80	2,10	119,65	89,74	109,22	127,30
90	1,33	55,99	41,99	51,11	59,57
100	0,89	28,38	21,29	25,91	30,20
110	0,61	15,35	11,51	14,01	16,33

Na Tabela 4 foram calculadas as distâncias de visibilidade pela Equação 14 de Ivey (1975), utilizando as velocidades de projeto e as intensidades pluviométricas da Tabela 3. Nota-se que os valores encontrados são superiores as distâncias de visibilidade de decisão preconizadas pela AASHTO (2001) para rodovias rurais.

**Tabela 4:** Distância de Visibilidade do Estudo de Caso

Velocidade (km/h)	Distâncias de Visibilidade de Decisão * (m)	Distância de Visibilidade (m)			
		3 faixas	4 faixas		
		$S_T = 2,0\%$	$S_T = 2,0\%$	$S_T = 2,5\%$	$S_T = 3,0\%$
80	140	170,99	207,94	181,93	163,93
90	170	254,75	309,79	271,04	244,23
100	200	363,89	442,52	387,17	348,87
110	235	502,42	610,98	534,57	481,68

Nota: \* Parada em via rural ( $t = 3,0$  s)

Portanto, para ampliação da plataforma da rodovia para quatro faixas de tráfego por sentido, mantendo a declividade longitudinal máxima de 4% e a intensidade pluviométrica encontrada para três faixas de tráfego, observa-se que a declividade transversal recomendada para atender a mesma intensidade pluviométrica está entre 2,5% a 3%.

#### **4. CONCLUSÕES E ANÁLISES CRÍTICAS**

Com base nas considerações anteriores procurou-se mostrar as variáveis mais importantes que influenciam no efeito da hidroplanagem, que ocorre quando os pneus perdem totalmente contato com o pavimento e começam a rodar sobre um pequeno filme d'água.

A principal equação para determinar a velocidade em que ocorre o fenômeno da hidroplanagem é a baseada nos estudos de Gallaway *et al* (1979), enquanto os estudos de Horne *et al* (1986) demonstram o efeito da hidroplanagem em caminhões não carregados, a partir da impressão do contato do pneu sobre o pavimento.

Para cálculo da intensidade pluviométrica em função das características geométricas e da espessura de lâmina d'água o método mais recomendado é o analítico da Equação 13, baseado nos estudos de Manning e o método Racional.

No estudo de caso foi analisada a declividade transversal para atender a ampliação da rodovia de três para quatro faixas de tráfego por sentido, onde se conclui que uma declividade transversal de 3% é a mais adequada, validando as recomendações de órgãos rodoviários em diversos países, para rodovias com quatro faixas de tráfego por sentido.

Também, foi estudado o efeito da intensidade pluviométrica na visibilidade em rodovias rurais, porém, conforme é demonstrado na Tabela 4 do estudo de caso, o fenômeno da hidroplanagem é o fator de segurança mais significativo.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AASHTO (2001) – A Policy on Geometric Design of Highways and Streets – American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Anderson D. A. Huebner R. S., Reed J. R., Warner J. C. e Henry J. J. (1998) Improved Surface Drainage of Pavements, NCHRP Web Document 16, Pennsylvania Transportation Institute, Pennsylvania.
- Chesterton, J., Nancekivell, N. e Tunnicliffe, N. (2006) The Use of the Gallaway Formula for Aquaplaning Evaluation, NZIHT & Transit NZ 8th Annual Conference 2006, New Zealand.
- Gallaway, B. M., e Rose, Jerry G. (1971) The Effects of Rainfall Intensity, Pavement Cross Slope, Surface Texture, and Drainage Length on Pavement Water Depths, Texas Transportation Institute, Research Report No. 138-5, Texas.
- Gallaway, B. M., Hayes, G. G.; Ivey, D. L.; Ledbetter, W. B.; Olson, R. M.; Ross, H. E., Jr.; Schiller, R. E., Jr.; Woods, D. L. (1979) Pavement and Geometric Design Criteria for Minimizing Hydroplaning, Federal Highway Administration, Report No. FHWARD-79-31, Washington, DC.
- Gallaway, B. M., Ivey, D. L., Mounce, J. M., e Yager, T. (2009) Water Accumulations, Influence of Roadway Surface Discontinuities on Safety, State of the Art Report, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Horne, W. B. e Dreher, R. C. (1963) Phenomena of Pneumatic Tire Hydroplaning, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC.

- Horne, W. B, Thomas J. Yager, and D. L Ivey. (1986) Recent Studies to Investigate Effects of Tire Footprint Aspect Ratio on Dynamic Hydroplaning Speed. The Tire Pavement Interface, ASTM STP 929, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Ivey, D.L., Lehtipuu, E. K., e Button, J. W. (1975) Rainfall and Visibility, The View from Behind the Wheel, Research Report 135-3, Texas Transport Institute, Texas.
- Ross N. F. e Russan K. (1968) The Depth of Rain Water on Road Surfaces, Road Research Laboratory, Ministry of Transport, RLL Report LR 236.
- Young, G.K., Walker, S.E., Chang, F. (1993) Bridge Deck Drainage Systems, Hydraulic Engineering Circular 21, Report FHWA-SA-92-010, Washington, DC.