

INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA VIA NO RISCO DE OCORRÊNCIA DE HIDROPLANAGEM

Henrique Foster de Oliveira¹, Felipe Issa Kabbach Jr.² e Carlos Yukio Suzuki³

¹Planservi Engenharia, Av. Brigadeiro Faria Lima, 1461 – 18º Andar, 01452-002, São Paulo/SP, Brasil

email: Henrique.oliveira@planservi.com.br <http://www.planservi.com.br>

²Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Avenida Prof. Luciano Gualberto, travessa do politécnico – número 380, CEP – 05508-010, São Paulo/SP, Brasil

³ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Avenida Prof. Luciano Gualberto, travessa do politécnico – número 380, CEP – 05508-010, São Paulo/SP, Brasil

Sumário

A hidroplanagem consiste na perda de aderência entre os pneus e a superfície do pavimento, em decorrência da presença de uma película de água impedindo o contato entre ambos. Neste artigo são apresentadas algumas considerações sobre o efeito das características geométricas da pista, associadas a condições ambientais e ao comportamento do motorista, na ocorrência da hidroplanagem. Os resultados de pesquisas realizadas pelos autores indicam a importância de uma análise crítica às práticas usuais de projeto com foco na segurança viária, através da identificação das combinações desses fatores que resultam em espessuras de lâmina d'água suficientes para a ocorrência desse fenômeno.

Palavras-chave: Hidroplanagem; Projeto Geométrico; Segurança Viária

1 INTRODUÇÃO

A hidroplanagem é um fenômeno decorrente da perda de contato entre o pneu e o pavimento pela presença de uma película de água entre ambos, resultando na perda de aderência e do controle de condução do veículo.

Ainda que seja um fenômeno razoavelmente reconhecido e que esteja relacionado a 17% de todas as colisões e a 23% das colisões em condições de pavimento úmido na Alemanha [1], é raro encontrar alguma referência à hidroplanagem em manuais de projeto de rodovias.

Em anos recentes tal tema tem sido foco de maior interesse, seja pela necessidade de ampliação de capacidade de tráfego em rodovias através de alargamentos das pistas de rodagem, seja pela expectativa do impacto advindo das mudanças climáticas em alguns países e/ou regiões, assim como pelo aumento na velocidade regulamentar implementado em alguns países para determinadas rodovias de boas características técnicas. O presente trabalho apresenta uma parte dos resultados obtidos em pesquisa mais abrangente, elaborada por um dos autores para obtenção do título de mestre em ciências.

A possibilidade de ocorrência desse fenômeno depende do efeito conjugado dos seguintes fatores: intensidades de precipitação de chuva na rodovia, características de textura do pavimento, geometria da pista de rodagem e soluções de drenagem aplicadas, estado de conservação dos pneus e velocidades praticadas pelos condutores em tais condições. No presente artigo são apresentados e comparados os impactos de diferentes características geométricas da pista de rodagem, a partir da utilização de métodos existentes de verificação de ocorrência da hidroplanagem, de forma a auxiliar a identificação de trechos rodoviários favoráveis à ocorrência de tal fenômeno.

2 VERIFICAÇÃO DO RISCO DE OCORRÊNCIA DE HIDROPLANAGEM

A hidroplanagem é resultado de uma completa separação entre o pneu e a superfície do pavimento pela pressão hidrodinâmica exercida por uma lâmina d'água. Na literatura são identificados três diferentes mecanismos físicos

que podem levar à ocorrência do fenômeno, sendo que em rodovias é predominante o entendimento de que a ocorrência mais comum é a do mecanismo típico da denominada “hidroplanagem dinâmica”. Tal mecanismo é resultante da insuficiência de capacidade drenante dos sulcos da banda de rodagem combinada com as características da macrotextura do pavimento, sendo que tal condição está relacionada a espessuras de água em que os efeitos inerciais do fluido são dominantes [2]. Nos pneus, o aumento da velocidade causa uma penetração progressiva da água, criando uma condição para que a base da banda de rodagem se curve para dentro e para cima, o que ocasiona uma redução da área de contato e consequentemente da estabilidade e capacidade de controle do veículo, como ilustrado na Figura 1.

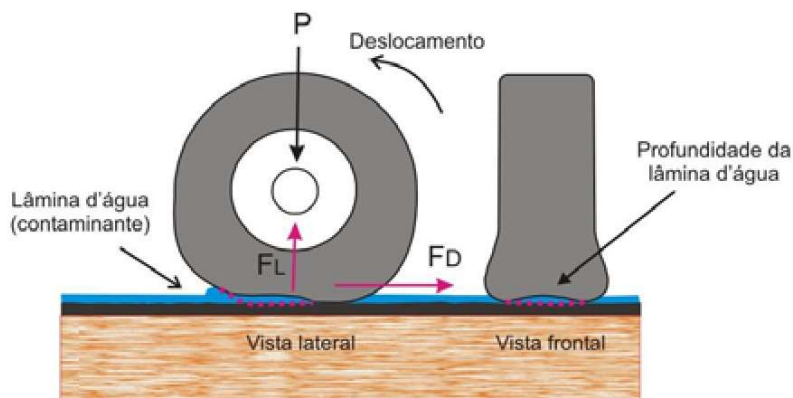


Fig.1. Hidroplanagem dinâmica [3]

Diversos fatores influenciam a ocorrência deste tipo de hidroplanagem, os quais podem ser divididos em 4 grupos, conforme apresentado na Figura 2.

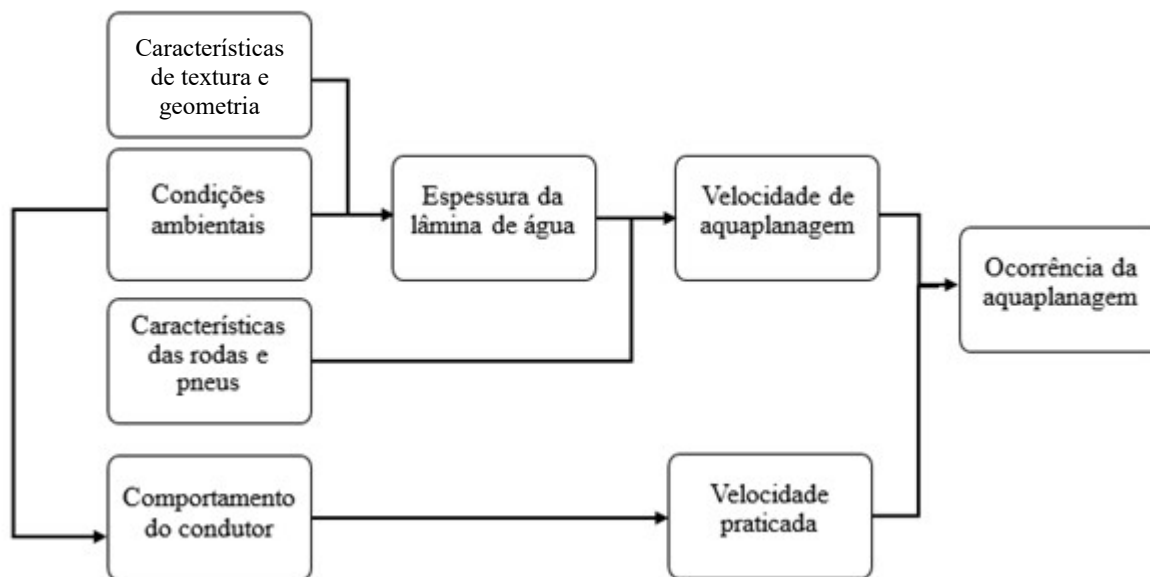


Fig.2. Fluxograma de ocorrência da hidroplanagem

Salienta-se que as velocidades praticadas pelos condutores são influenciadas, dentre outros fatores, pelas condições ambientais, especialmente pelas intensidades de precipitação das chuvas. Existe um consenso de que precipitações mais intensas implicam em maiores reduções nas velocidades praticadas pelos motoristas. Contudo, apesar da existência de vários estudos neste campo, ainda não foi alcançado um consenso sobre a magnitude dos valores

destas reduções e sua relação com as intensidades de chuva. Assim, há que se considerar que os valores adotados para as velocidades de deslocamento dos veículos em condição de pista de rodagem molhada poderão variar em função das condições e premissas consideradas. De qualquer maneira, cabe salientar que o comportamento do motorista não é o foco do presente trabalho.

Diversos modelos foram desenvolvidos com objetivo de avaliar o fenômeno da hidroplanagem. Dentre os mais antigos concebidos destacam-se os desenvolvidos pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* [4], na década de 60, elaborados para avaliar a ocorrência de hidroplanagem em ambientes aeroportuários. Existem contribuições recentes como os modelos inseridos nos programas computacionais desenvolvidos na *University of South Florida* [5] e na *Universität Stuttgart* [1]. De maneira geral, esses modelos têm sido concebidos com os cálculos sendo desenvolvidos em duas etapas: a previsão da espessura de lâmina de água no pavimento e a previsão da velocidade a partir da qual ocorre a hidroplanagem. Cada um dos modelos de verificação do risco de hidroplanagem foi concebido com base em premissas diferentes, em sua maioria empíricas. Assim, os modelos apresentados no presente trabalho foram selecionados após cuidadosa análise e revisão de trabalhos mais recentes sobre o tema, sendo que foram selecionados aqueles que avaliam a ocorrência de hidroplanagem dinâmica em condições compatíveis com a operação rodoviária.

Na descrição resumida dos modelos apresentados mais adiante os nomes e unidades das variáveis foram padronizados de acordo com o indicado no Quadro 1:

Quadro 1. Padronização das unidades das variáveis

Variável	Descrição	Unidade
h_F	Espessura da lâmina de água acima da macrotextura do pavimento	mm
TMP	Altura média da macrotextura do pavimento	mm
L_F	Comprimento da linha de água	m
I	Intensidade pluviométrica	mm/h
S_F	Declividade da linha de água	m/m
V_H	Velocidade de ocorrência da hidroplanagem	km/h
P_P	Pressão de enchimento do pneu	kPa
SD	Redução relativa da rotação da roda no início da hidroplanagem	%
S_P	Profundidade de sulco da banda de rodagem	mm
ϕ	Fração da área de contato dos pneus que é composta por sulcos	%
P_C	Carga por roda	kN
$P_{C,perm}$	Carga máxima permitida por roda	kN
P_L	Largura da área de contato do Pneu	mm

Os modelos propostos por Gallaway [6] utilizaram dados combinados de pista de rodagem de teste e ensaios de laboratório para avaliar o risco de hidroplanagem em rodovias. Estes modelos foram desenvolvidos considerando-se as características de veículos de passeio.

O modelo de Gallaway foi dividido nas equações (1) a (3), sendo que a equação (2) já havia sido proposta por Agrawal [7]. Ressalta-se que a equação (3) é válida somente para espessuras de lâmina de água maiores que 2,4 mm, sendo que a equação (2) é utilizada nos casos em que a espessura é inferior a tal valor.

$$h_F = 0,01485 \left[TMP^{0,11} L_F^{0,43} I^{0,59} \left(\frac{1}{S_F} \right)^{0,42} \right] - TMP \quad (1)$$

$$V_H = 96,9 \cdot h_F^{-0,259} \quad (2)$$

$$V_H = 0,9143 \cdot SD^{0,04} \cdot P_P^{0,3} \cdot (S_P + 0,794)^{0,06} \cdot \text{máximo} \left\{ \begin{array}{l} \frac{12,639}{h_F^{0,06}} + 3,507 \\ \left(\frac{22,351}{h_F^{0,06}} - 4,97 \right) \cdot TMP^{0,14} \end{array} \right. \quad (3)$$

Para a velocidade de ocorrência da hidroplanagem há também o método proposto na Alemanha por Gengenbach [8], o qual considera o uso de pneus sem ranhuras e que foi posteriormente adaptado por Höcker[9], permitindo a sua aplicação para as condições atuais de operação rodoviária. Tal modelo é caracterizado na equação (4).

$$V_H = 5080 \sqrt{\frac{P_C}{P_L \cdot (h_F - \varphi \cdot (S_P - 0,8)) \cdot \left(46 \left(\frac{P_C}{P_{C,perm}}\right)^{-1,342}\right)}} \quad (4)$$

Por último, temos o método de avaliação da espessura da lâmina de água sobre o pavimento proposto por Herrmann [1], o qual é baseado na solução de onda cinemática de saída variável e calibrado a partir de dados de campo para utilização de diversos ensaios de macrotextura do pavimento. Na equação (5) é apresentada a variação da equação calibrada para uso do ensaio de mancha de areia como medida da macrotextura do pavimento.

$$h_F = \left[0,26334 \cdot \left(L_F \cdot \frac{I}{60} \right)^{0,4158} \cdot S_F^{-0,3314} \cdot TMP^{0,4177} \right] - TMP \quad (5)$$

3 FATORES DE INFLUÊNCIA

Os fatores de influência na ocorrência da hidroplanagem são os já caracterizados pelas variáveis utilizadas nos modelos, além da velocidade praticada pelos condutores, a qual, conforme mencionado anteriormente, está relacionada a determinadas condições. A seguir é apresentada uma breve descrição dos fatores e alguns de seus valores típicos.

A intensidade de chuva que se precipita sobre um trecho de rodovia possui caracterização de certa complexidade, pois varia em função do tempo, espaço, condições atmosféricas regionais, dentre outros fatores. Durante o desenvolvimento do presente estudo foram avaliadas as precipitações na cidade de São Paulo de acordo com os dados obtidos na estação pluviométrica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, entre 01/01/2000 e 31/12/2015. Durante este período foram registradas aproximadamente 870 h/ano de precipitações com intensidade média de 3 mm/h e máxima de 160 mm/h. Em tal distribuição verificou-se que em 35 h/ano ocorrem intensidades superiores a 10 mm/h e que em 5 h/ano intensidades maiores que 30 mm/h.

Os sulcos da banda de rodagem têm sua profundidade variável de acordo com o desgaste dos pneus durante seu uso, sendo no Brasil proibida a circulação com pneus que possuam sulcos menores do que 1,6 mm. Por outro lado, em levantamento realizado nos Estados Unidos [8], foi possível constatar que, para veículos de passeio, os valores desse parâmetro estão compreendidos entre 0 e 13 mm, sendo 5,5 mm o valor médio obtido no levantamento. No mesmo levantamento também foram coletados os dados de pressão de enchimento dos pneus, a qual apresentou variação de 20 a 413 kPa, com valor médio de 210 kPa.

A macrotextura do pavimento foi analisada a partir dos resultados de ensaios de mancha de areia fornecidos pela Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP). Tais ensaios foram realizados em diversas rodovias do Estado de São Paulo entre os anos de 2014 e 2017, sendo que os valores obtidos variaram de 0,2 a 1,5 mm, com valor médio de 0,6 mm.

Com base em consulta aos modelos de pneus disponíveis no Brasil para veículos de passeio, identificou-se que a largura média da área de contato da banda de rodagem é 175 mm, sendo que, segundo o mesmo critério, a carga por roda pode ser caracterizada pelo valor de 2,5 kN.

A redução relativa na rotação da roda foi estabelecida como 10%, segundo proposto por Gallaway [6]; a relação entre a área dos sulcos e a área de contato do pneu com o pavimento possui valor característico de 30 %, conforme Herrmann [1];

4 ESTUDO DO IMPACTO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS NA OCORRÊNCIA DE HIDROPLANAGEM

As variáveis que caracterizam a declividade e o comprimento das linhas de fluxo de água na pista de rodagem são as únicas diretamente relacionadas à configuração geométrica da via. Para estas variáveis pode-se identificar duas configurações distintas para a geometria das linhas de fluxo:

- nos segmentos da pista de rodagem onde ocorre inversão do sentido de inclinação transversal da mesma, o fluxo d'água percorre a superfície do pavimento seguindo uma trajetória parabólica, como ilustrado na Figura 3;
- em trechos externos aos segmentos onde ocorre a inversão do sentido da declividade transversal o fluxo aproxima-se de uma trajetória retilínea.

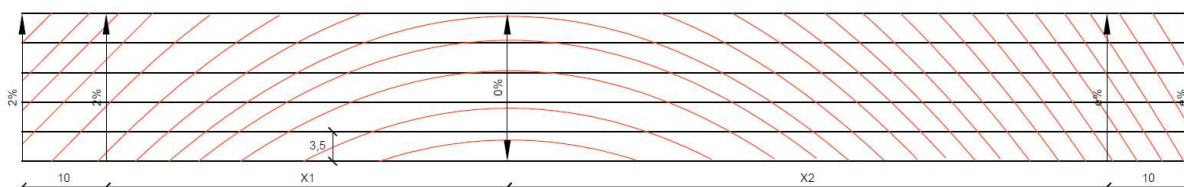


Fig.3. Linhas de fluxo de água em trecho de transição de superelevação

A lâmina d'água formada na pista de rodagem possui espessura variável ao longo da superfície do pavimento. Para condições constantes de intensidade de chuva e de macrotextura do pavimento, esta espessura irá aumentar de acordo com o comprimento da linha de fluxo, de maneira que a via de tráfego localizada em cota mais baixa estará sujeita a maiores espessuras de lâmina d'água. Considerando os diferentes comportamentos identificados e a variabilidade das espessuras de água para diferentes vias de tráfego foi desenvolvido um algoritmo para cálculo dos valores de comprimento e declividade das linhas de fluxo de água em qualquer ponto da pista de rodagem.[11].

4.1 Premissas e valores adotados nos estudos

Nos estudos e análises comparativas optou-se por utilizar valores médios para as variáveis utilizadas nos modelos de cálculo, uma vez que a adoção de valores críticos poderia ocultar algum efeito da variação das características geométricas [11]. Os valores adotados para as variáveis são apresentados no Quadro 2, a seguir.

Quadro 2. Valores utilizados para os cenários de características geométricas

Variável	Valor adotado
Macrotextura do pavimento (TMP)	0,6 mm
Intensidade pluviométrica (I)	10 mm/h
Profundidade dos sulcos da banda de rodagem (S_p)	5,5 mm
Pressão de enchimento dos pneus (P_p)	210 kPa
Redução da velocidade de rotação da roda no início da hidroplanagem (SD)	10 %
Carga por roda (P_c)	2,5 kN
Largura da área de contato dos pneus (P_L)	175 mm
Proporção da área de contato que é composta por sulcos (φ)	30 %

Para as características geométricas foram analisados diversos cenários, sendo que, em cada um deles, foram adotados valores diferentes para apenas um dos parâmetros, mantendo-se os demais constantes. Com tal procedimento resultaram 63 possíveis combinações para os valores apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Valores utilizados para os cenários de características geométricas

Declividade longitudinal (S_L)	Declividade transversal (S_T)	Largura da pista de rodagem (W)
0,5%	Constante = 2 %	3 vias de tráfego (10,5 m)
2,0%	Constante = 2,5%	4 vias de tráfego (14,0 m)
4,0%	Constante = 3%	5 vias de tráfego (17,5 m)
	Constante = 4%	
	Constante = 6%	
	Constante = 8%	
	Variável de -2% a 2%	

O comprimento para transição da superelevação foi determinado de acordo com os critérios preconizados pela AASHTO [12], segundo os quais tal comprimento é definido pelo máximo gradiente relativo admissível entre os bordos da pista de rodagem no trecho em que ocorre tal transição.

Contudo, é prática comum no Brasil associar o comprimento da curva horizontal de transição (clotóide) ao valor necessário para a transição da superelevação. Adotada tal prática, ao se levar em conta o valor mínimo absoluto do comprimento da clotóide estabelecido nos critérios atuais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes [13], em alguns casos específicos os gradientes de transição da superelevação podem resultar muito suaves.

Como exemplo de tais casos específicos, são apresentados no Quadro 4 os valores que resultam para o gradiente de transição da superelevação segundo o critério estabelecido pela AASHTO e conforme a prática adotada no Brasil mencionada acima.

Quadro 4 - Comprimentos adotados para transição de 1% na superelevação considerando-se uma velocidade de projeto de 100 km/h

Nº de vias de tráfego	Mínimo AASHTO	Valor crítico para prática brasileira associada aos critérios do DNIT
3 (10,5 m)	15,91 m	30,00 m
4 (14,0 m)	19,89 m	30,00 m
5 (17,5 m)	23,86 m	30,00 m

Para todos os casos analisados foram realizadas combinações dos modelos mencionados anteriormente. Contudo, como os resultados obtidos pela combinação do modelo de previsão da velocidade de ocorrência de hidroplanagem de Gallaway com o modelo de previsão da espessura de lâmina de água de Hermann se mostraram mais conservadores, no presente trabalho estão sendo apresentados apenas os resultados relativos a tal combinação.

Nos casos em que a superelevação da curva é maior do que 2% a configuração das linhas de fluxo de água na zona de giro da superelevação resulta muito similar ao caso em que a superelevação da curva é igual a 2%, razão pela qual optou-se por não utilizar tais casos neste trabalho. No procedimento de cálculo para identificação dos possíveis trechos com possibilidade de ocorrência de hidroplanagem limitou-se o valor de velocidade praticada pelos motoristas em 200 km/h.

4.2 Resultados obtidos para os trechos de declividade transversal constante

Os resultados obtidos com as possíveis combinações de características geométricas em trechos de declividade constante são apresentados no Quadro 5. Com base em tais resultados fica evidenciado que, em segmentos de pista de rodagem com tal configuração geométrica, tanto o aumento da declividade longitudinal como a redução da declividade transversal podem ocasionar a hidroplanagem a velocidades mais reduzidas de deslocamento dos veículos. Tal redução é marginal e decorre do aumento do comprimento das linhas de fluxo ao ter uma trajetória com ângulo reduzido em relação ao eixo da via em ambos os casos. A relação entre as declividades (longitudinal e transversal) e a velocidade de ocorrência de hidroplanagem permite afirmar que, desde que seja garantida uma declividade transversal mínima, a presença de curvas verticais não implica em aumento no risco de ocorrência deste fenômeno.

Outra constatação baseada em tais resultados é que o aumento do número de vias de tráfego e da largura da pista de rodagem produzem uma elevação significativa do risco de hidroplanagem nas vias de tráfego de cotas mais baixas da via.

Quadro 5 - Velocidade de ocorrência de hidroplanagem nos trechos de declividade transversal constante

Velocidade de ocorrência de hidroplanagem - $S_T=2\%$					
Nº de vias de tráfego	$S_L=0,5\%$	$S_L=1\%$	$S_L=2\%$	$S_L=3\%$	$S_L=4\%$
1	188	185	179	174	169
2	106	105	104	103	103
3	98	98	97	97	96
4	94	94	93	92	92
5	91	91	90	89	89
Velocidade de ocorrência de hidroplanagem - $S_T=2,5\%$					
1	200	200	200	200	197
2	109	109	108	107	107
3	101	101	101	100	99
4	97	97	96	95	95
5	93	93	93	92	92
Velocidade de ocorrência de hidroplanagem - $S_T=3\%$					
1	200	200	200	200	200
2	112	112	112	111	110
3	104	104	103	103	102
4	99	99	99	98	97
5	96	95	95	95	94
Velocidade de ocorrência de hidroplanagem - $S_T=4\%$					
1	200	200	200	200	200
2	118	118	118	117	116
3	109	109	108	108	107
4	103	103	103	102	102
5	99	99	99	99	98
Velocidade de ocorrência de hidroplanagem - $S_T=6\%$					
1	200	200	200	200	200
2	128	128	127	127	127
3	116	116	116	116	115
4	109	109	109	109	109
5	105	105	105	105	104
Velocidade de ocorrência de hidroplanagem - $S_T=8\%$					
1	200	200	200	200	200
2	136	136	136	136	136
3	122	122	122	122	122
4	115	115	114	114	114
5	110	110	109	109	109

4.3 Resultados obtidos para os trechos de declividade transversal variável

Os resultados obtidos para os trechos de declividade transversal variável são de análise mais complexa, pois a extensão sujeita à ocorrência deste fenômeno deixa de ser dependente apenas da extensão do trecho e passa a variar de acordo com a taxa de giro da superelevação, largura da pista de rodagem e declividade longitudinal.

Na Figura 4 são apresentadas as extensões sujeitas à ocorrência de hidroplanagem para velocidades de 110 e 90 km/h em trechos de transição de superelevação e com variação da declividade longitudinal de 0,5% a 4%.

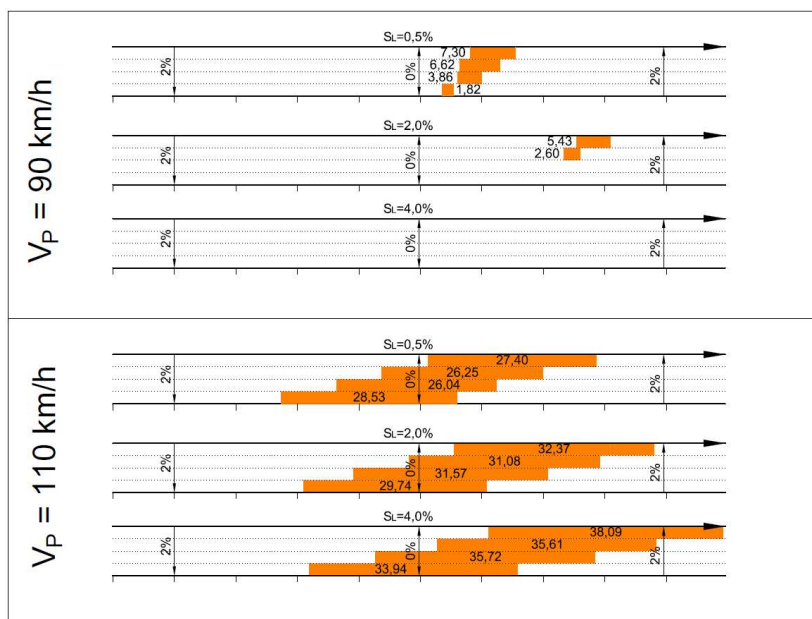


Fig.4. Efeito da declividade longitudinal na extensão sujeita à ocorrência de hidroplanagem

A Figura 4 indica que as extensões sujeitas a menores velocidades de ocorrência de hidroplanagem reduzem-se com o aumento das declividades longitudinais, sendo tal fato decorrente da redução das espessuras da lâmina d'água em função do aumento de declividade do fluxo de água. Entretanto, com a elevação da declividade longitudinal da pista de rodagem, as linhas de fluxo de água resultam mais extensas e com curvatura mais suave, ocasionando uma maior área sujeita à ocorrência desse fenômeno em velocidades mais elevadas.

Na Figura 5 são apresentadas as extensões sujeitas à ocorrência de hidroplanagem para velocidades de 110 e 90 km/h em trechos de transição de superelevação e para variação da largura da via de 10,5 m (3 vias de tráfego) a 17,5 m (5 vias de tráfego).

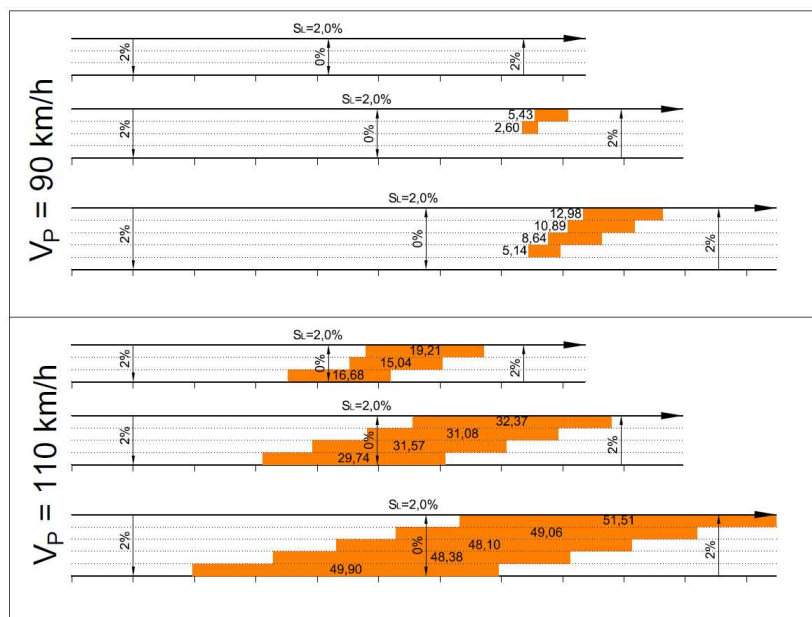


Fig.5. Efeito da largura na extensão sujeita à ocorrência de hidroplanagem

Conforme caracterizado na Figura 5, o aumento da largura da pista de rodagem amplia de forma significativa a área sujeita à ocorrência de hidroplanagem. Esse efeito resulta tanto da ampliação da área pavimentada como do aumento do comprimento para transição de superelevação. Como ilustrado na Figura 5, no caso de uma pista de rodagem com 5 vias de tráfego o risco de ocorrência de hidroplanagem está presente em ao menos uma das vias de tráfego na quase totalidade da extensão do trecho de transição.

A influência do comprimento da transição de superelevação no risco de ocorrência de hidroplanagem está ilustrada na Figura 6. Como mencionado anteriormente, no desenvolvimento do projeto geométrico de rodovias, é prática comum no Brasil associar o comprimento da transição de superelevação ao da curva horizontal de transição. Contudo, em casos específicos, essa prática pode resultar em transições demasiadamente suaves, conforme descrito a seguir.

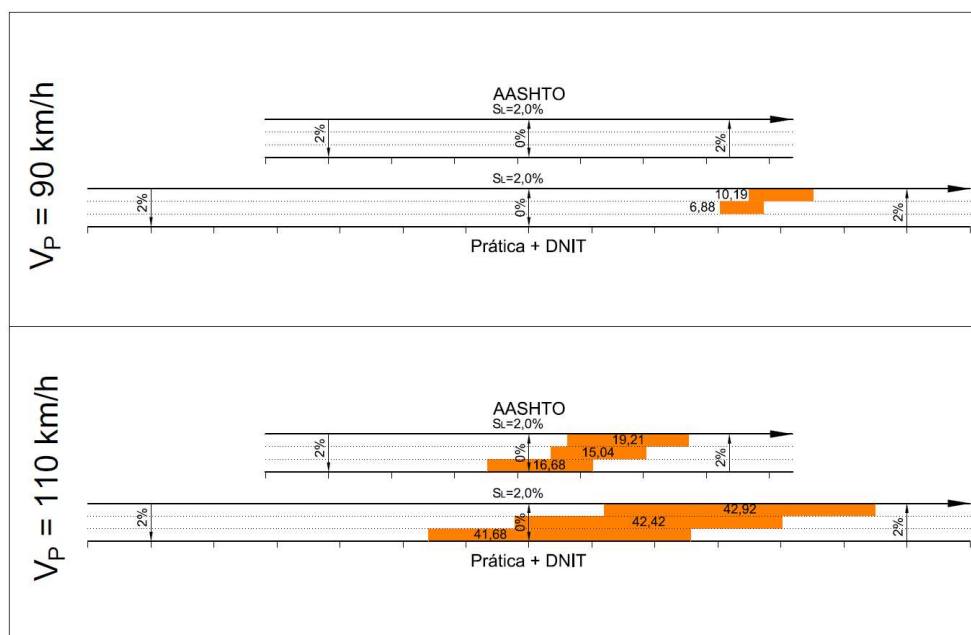


Fig.6. Efeito do comprimento de transição da superelevação na extensão sujeita à ocorrência de hidroplanagem

Considerando as últimas recomendações da AASHTO, no caso de uma curva de raio 700 m, a superelevação indicada seria de 2% para uma velocidade de projeto de 100 km/h, sendo que, para tal raio de curvatura, seria dispensável a inserção de uma curva horizontal de transição entre a tangente e a curva circular.

Por outro lado, de acordo com o Manual de Projeto de Rodovias Rurais, em uso pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, a curva de transição seria necessária e deveria possuir comprimento mínimo de 60 m. Assim, adotado tal procedimento, a transição de superelevação passa de uma rampa relativa de 1:227 (AASHTO) para 1:427 (Prática Brasileira + DNIT), resultando em um aumento da área sujeita ao risco de hidroplanagem maior do que quando considerada a implantação de uma via de tráfego adicional.

Salienta-se que o caso selecionado para apresentação no presente trabalho representa uma situação crítica, sendo que, em casos com mais vias de tráfego ou com diferentes velocidades de projeto, as diferenças obtidas para extensão sujeita ao risco de ocorrência de hidroplanagem serão geralmente menores.

5 CONCLUSÕES

Considerando-se as premissas adotadas e os resultados obtidos, pode-se afirmar que o risco de hidroplanagem está presente em configurações típicas de geometria de rodovias de alto padrão e que tal risco é mais elevado principalmente em zonas de transição de superelevação e em pistas de rodagem de elevado número de vias de tráfego.

Mesmo que não tenham sido utilizados valores críticos para as variáveis não relacionadas à geometria da via, ainda assim foram identificadas condições favoráveis à ocorrência de hidroplanagem em vários casos. Assim, trechos mais extensos estariam sujeitos a tal fenômeno caso estivessem sendo considerados valores mais conservadores para tais variáveis.

Embora seja esperado que diminutas extensões sujeitas à ocorrência de hidroplanagem não representem um risco à segurança da rodovia, não foram encontrados estudos que correlacionem a magnitude de tais extensões e registros de acidentes, o que evidencia a necessidade de desenvolvimento de estudos com foco em tal tema.

Convém ressaltar que, apesar do desenvolvimento de diferentes métodos para previsão da ocorrência da hidroplanagem, de maneira geral os manuais de projeto geométrico utilizados no Brasil e no exterior não estabelecem um procedimento para a verificação desse fenômeno. Os resultados apresentados no presente artigo procuraram demonstrar a conveniência de atualização e complementação dos critérios e recomendações para o projeto geométrico de rodovias, de modo a estabelecer práticas para redução das extensões sujeitas a tal fenômeno.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Planservi Engenharia pelo apoio dado durante a elaboração dos estudos.

7 REFERÊNCIAS

1. S. R. Herrmann, Simulationsmodell Zum Wasserabfluss- Und Aquaplaning-Verhalten Auf Fahrbahnoberflächen. Stuttgart: Universität Stuttgart Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 2008.
2. A. L. Browne, A Mathematical Analysis for Pneumatic Tire Hydroplaning. Surface Texture Versus Skidding: Measurements, Frictional Aspects and Safety Features of Tire-Pavement Interactions, ASTM STP 583, 75-94, 1975.
3. J. P. S. Silva, Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
4. W. B. Horne, R. C. Dreher, Phenomena of pneumatic tire hydroplaning, Langley Research Center, Langley Station, Washington D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1963.
5. M. Gunaratne et al., Hydroplaning on multi lane facilities, Report No. BDk84 977-14, FHWA. University of South Florida, Tampa, 2012.
6. B. M. Gallaway et al., Pavement and geometric design criteria for minimizing Hydroplaning, Report No. FHWARD-79-31, Federal Highway Administration, Washington, DC, 1979.
7. S. K. Agrawal, W. E. Meyer, Measurement of hydroplaning potential, Pennsylvania Transportation Institute, Pennsylvania State University, PA, 1977.
8. W. Gengenbach, Das Verhalten von Kraftfahrzeugreifen auf trockener und insbesondere auf nasser Fahrbahn, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1967.
9. H. J. Höcker, Die Oberflächenentwässerung von Fahrbahnen und ihre Bedeutung für den Straßenentwurf, Aachen: Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, 1971.
10. R. Subramanian, K. Thiez, Tire Pressure Special Study Tread Depth Analysis, National Center for Statistics and Analysis of the National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C., 2001.
11. H. F. Oliveira, Contribuição para análise da ocorrência de aquaplanagem em rodovias, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
12. American Association of State Highway and Transportation Officials, A policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington, D.C., 2018.
13. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (Publicação IPR 706), Rio de Janeiro, 1999.