

Observatório de Segurança de Estradas e Cidades (OSEC) – organização não governamental com sede no Tribunal da Relação de Lisboa.

ESTUDO DE SEGURANÇA RODOVIÁRIA

O PERIGO GRAVE DE HIDROPLANAGEM NAS ESTRADAS PORTUGUESAS FORMULAÇÃO DE CÁLCULO E PROPOSTAS PARA RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS

1 - O QUE É A HIDROPLANAGEM (AQUAPLANAGEM OU “HYDROPLANING” OU “AQUAPLANING”)

Quando os pneus do veículo se deslocam sobre pavimento molhado, com a presença de lâmina de água acima das asperezas do pavimento, desenvolvem-se pressões hidrodinâmicas na área de contacto do pneu com o pavimento que resultam da dificuldade, do pneu e da estrada, não conseguirem expulsar toda a água pisada pelo pneu. Esta área de água sob o pneu que, pela rapidez do movimento, não conseguiu ser expulsa debaixo do pneu, vai dificultar o contacto entre o pneu e o pavimento.

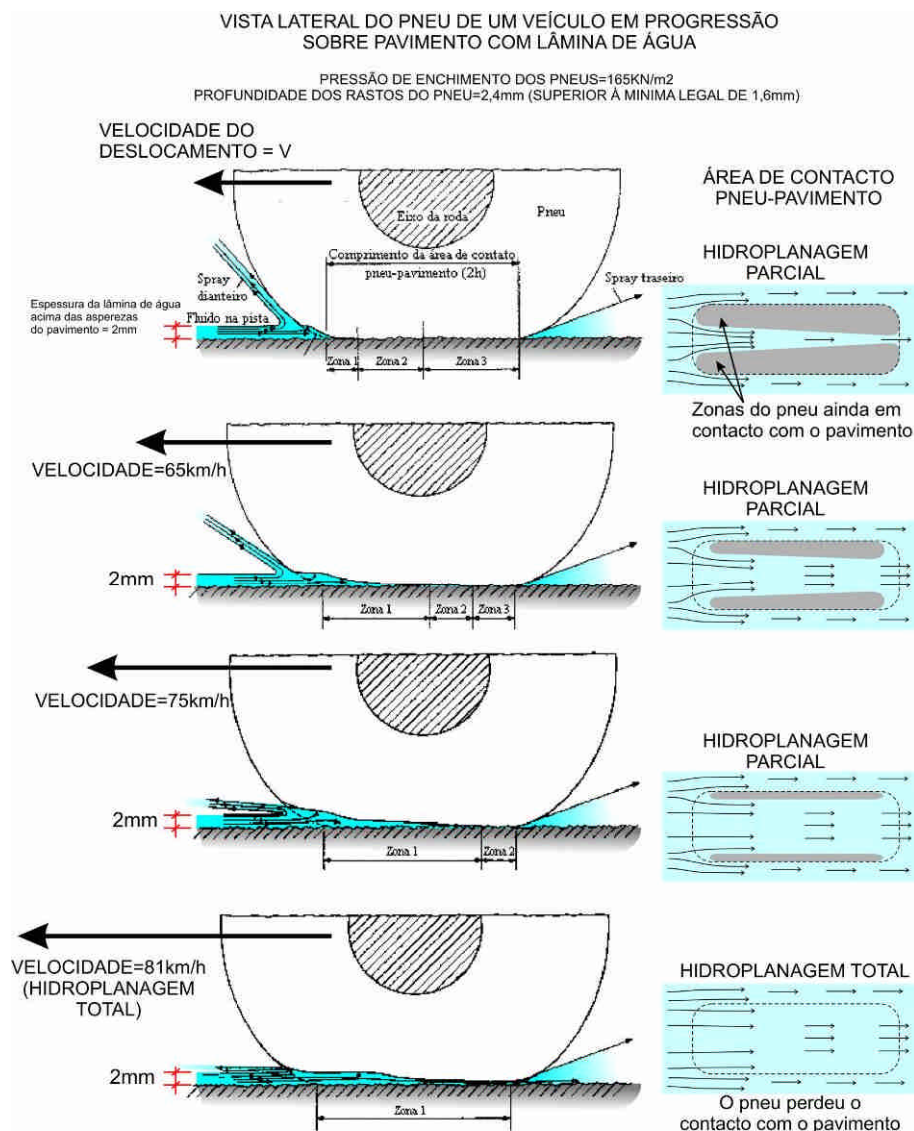


Fig.1

Com o aumento da velocidade do veículo, a área de água pisada pelo pneu, e que não consegue ser expulsa debaixo do pneu, vai sendo cada vez maior até que, para um ligeiro aumento de velocidade, a área de contacto pneu-pavimento está toda contaminada com uma lâmina água, e os pneus perdem o contacto com o pavimento, ocorrendo a **hidroplanagem total** com a perda do domínio da direcção do veículo, situação que corresponde a perigo concreto para a vida dos utentes da estrada. Esta é a **Velocidade Crítica de Hidroplanagem**, a partir da qual ocorre a **hidroplanagem total**.

Na imagem anterior, citada em (2), (3), (4) e em (5), comentando pesquisas realizadas pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), podemos observar a progressão da contaminação da lâmina de água sob o pneu de um veículo ligeiro, com o progressivo aumento da velocidade do veículo, até se gerar a **hidroplanagem total**. Complementámos as imagens com outras, da área de contacto pneu/pavimento, com a contaminação progressiva da lâmina de água sob o pneu dum veículo ligeiro em movimento e cujos pneus são caracterizados por enchimento a baixa pressão. Os pneus dos veículos pesados e dos aviões são caracterizados por enchimento a pressão mais elevada e o padrão de progressão da contaminação com a lâmina de água assume outra tipologia conforme se pode observar na seguinte ref. bibliograf. (6)-pág.41.

Comentámos esta imagem com o exemplo de uma lâmina de água com espessura de 2 milímetros acima das asperezas do pavimento, com o pneu de um veículo ligeiro insuflado com uma pressão de 165KN/m², inferior à habitual, com ranhuras no rasto do pneu com a profundidade de 2,4mm e com a correspondente velocidade crítica de hidroplanagem de 81km/h, a partir da qual se instala a hidroplanagem total.

Vista do pneu a rolar sobre o pavimento

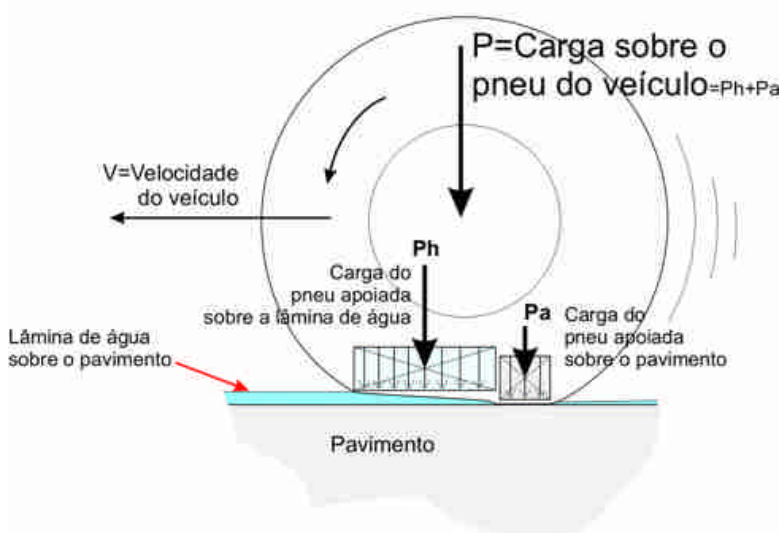


Fig.2

Para velocidades próximas da velocidade crítica de hidroplanagem, a maior parte da carga vertical (P_h) descarregada pelo pneu apoia-se sobre a lâmina de água e, apenas uma pequena parte da carga vertical do pneu (P_a) é descarregada sobre o pavimento, tal como se pode observar na figura ao lado.

Ou seja, com a aproximação da velocidade do veículo à Velocidade Crítica de Hidroplanagem, a **acção vertical do pneu sobre o pavimento** é gradualmente mais reduzida até ser anulada no instante em que ocorre a hidroplanagem total. No entanto, a **acção vertical do pneu sobre o**

pavimento é a componente vertical que causa o atrito, essencial à segurança no percurso das curvas e à estabilidade do movimento do veículo. Desta forma, o **valor da Velocidade Crítica de**

Hidroplanagem deverá ser suficientemente superior à velocidade esperada praticada nos veículos.

Na proximidade à Velocidade Crítica de Hidroplanagem, a execução de uma travagem, ou do surgimento da aceleração centrífuga resultante do percurso de uma curva, ou da actuação duma força lateral causada por vento lateral, pode ocasionar a perda do domínio da direcção do veículo, sem ter havido hidroplanagem total, porque as condições de atrito entre os pneus e o pavimento estão fortemente prejudicadas pela contaminação parcial da lâmina de água sob o pneu.

Este tipo de acidente tem como causa a **hidroplanagem parcial** e, segundo Donald et al (7), os fenómenos de hidroplanagem parcial são os que ocorrem com maior frequência, podendo ter consequências graves.

Quando, durante uma chuvada, a velocidade crítica de hidroplanagem é ilicitamente baixa, próxima da velocidade de circulação dos veículos, os condutores circulam em condições muito perigosas, com pavimento muito escorregadio, sem que possam ter consciência desse perigo que, como veremos, resulta de deficiência grave do pavimento.

É por esta razão que a Velocidade Crítica de Hidroplanagem, que se calcula para um local da estrada, deve ser suficientemente superior à velocidade esperada praticada na estrada, de forma a garantir os níveis mínimos de atrito para evitar o risco proibido de perda do domínio da direcção do veículo. Esse risco é maior nas zonas de disfarce da sobrelevação, nas zonas de curva em planta com fraca sobrelevação e fraca inclinação longitudinal, nas zonas caracterizadas por travagens frequentes e em zonas desabrigadas caracterizadas por ocorrência de ventos laterais intensos.

A hidroplanagem a que nos referimos neste artigo também é referenciada por hidroplanagem dinâmica e, no ambiente rodoviário, é o tipo de hidroplanagem dominante.

No caso do veículo realizar uma travagem brusca, com rodas bloqueadas, sobre pavimento com lâmina de água acima das suas asperezas, a velocidade crítica de hidroplanagem passa a ser cerca de 84% da velocidade crítica de hidroplanagem dinâmica (a do caso do livre rolamento), já referida anteriormente (8).

Existem outros tipos de hidroplanagem associados, correntemente, a pavimentos muito defeituosos, lisos, sem microtextura (ou seja, onde a superfície exposta dos agregados do pavimento está polida) - (8) e outros:

- a **hidroplanagem viscosa** ocorre em pavimentos lisos, com pneus lisos, sem ranhuras, e, para tal, basta a existência de uma lâmina de água muito fina (espessura da ordem de 0,06mm) . Esta hidroplanagem viscosa ocorre para velocidades muito inferiores à da hidroplanagem dinâmica e o seu risco de ocorrência é agravado com o aumento da viscosidade da água por efeito de contaminação por exemplo com argilas, siltes, etc. Neste último caso a hidroplanagem viscosa pode ocorrer, a velocidades muito baixas, até com pneus com ranhuras em boas condições;

- a **hidroplanagem por selagem do pneu** ocorre na sequência duma travagem brusca, com as rodas bloqueadas, sobre o pavimento molhado que, sendo muito liso, sem microtextura, permite que a borracha do pneu, aquecida e mole pela fricção, deslize sobre uma película de água sobre o pavimento.

2 – CÁLCULO DA VELOCIDADE CRÍTICA DE HIDROPLANAGEM (DINÂMICA)

Desde a década de 1970 que a Velocidade Crítica de Hidroplanagem (V_h) pode ser calculada pela expressão de Gallaway - (9)-pág.10, (10)-pág.24:

$$V_h = 0,9143 \times SD^{0,04} \times P^{0,3} \times (TD + 0,794)^{0,06} \times B \quad (1)$$

Onde B é o máximo dos seguintes valores:

$$B1 = 12,639 / h^{0,06} + 3,507$$

$$B2 = (22,351 / h^{0,06} - 4,97) \times Aa^{0,14}$$

com :

h (mm) = altura de água acima das asperezas do pavimento

Aa (mm)=altura equivalente de areia que caracteriza a macrorugosidade da superfície do pavimento e que resulta do ensaio da mancha de areia realizado sobre a superfície do pavimento (ver anexo 1). Quanto mais salientes são os agregados do pavimento, maior é a macrorugosidade e maior é a Altura de Areia desse pavimento.

SD = Spin Down Speed $= (W_d - W_w) / W_d \times 100$ e considera-se 10 (10%) no início da hidroplanagem.

W_d = velocidade de rotação do pneu em superfície seca

W_w = velocidade de rotação do pneu sobre a lâmina de água, após ter entrado em spin down. O pneu não motriz quando entra em hidroplanagem começa a perder rotação chegando mesmo a perder toda a rotação, enquanto esse pneu continua a deslizar sobre a lâmina de água em hidroplanagem total - ver filmagens da NASA disponíveis na Internet (<http://www.archive.org/details/gov.ntis.AVA1295VNB1>).

A este efeito, chama-se Spin Down.

P (KN/m²)= pressão de insuflação do pneu. Um valor corrente da pressão dos pneus é de 200KN/m² ou 200 KPa.

TD (mm) = profundidade das ranhuras dos rastros dos pneus. A profundidade mínima permitida em Portugal é de 1,6mm.

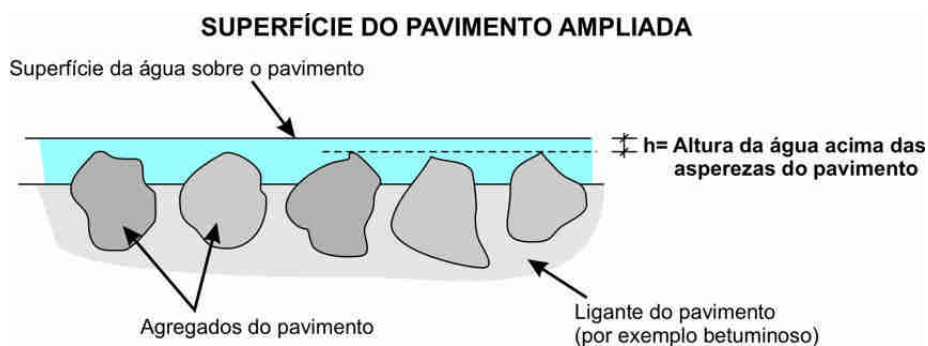


Fig.3

Para alturas de água (h) muito finas a expressão (1) de Gallaway não se deve aplicar. Nestas circunstâncias, de lâmina de água muito fina, foi desenvolvida a expressão (2) de Agrawall e Henry que foi obtida de uma série de ensaios realizados com veículos usando pneus com pressão de enchimento de 165KN/m² (inferior à pressão corrente de 200-220KN/m²) e com ranhuras no rasto com profundidade TD=2,38mm~2,4mm.

Deste modo, desde 1985 que a verificação das condições de segurança contra a hidroplanagem, considerando qualquer espessura da lâmina de água, se realiza calculando a Velocidade Crítica de Hidroplanagem pelas seguintes expressões:

- a expressão (2) utiliza-se para lâmina de água com espessura (h) menor que 2,4mm;
- e a expressão (3) utiliza-se para lâmina de água com espessura (h) maior ou igual a 2,4mm e, esta expressão resulta da expressão (1), considerando fixas as seguintes variáveis TD=2,4mm e P=165KN/m² - (12), (11), (13), (14)-1998-Anderson et al.

Para h<2,4mm aplica-se a expressão de Agrawall e Henry:

$$V_h \text{ (km/h)} = 96,899 \times h^{-0,259} \quad \text{..... com h (mm)} \quad (2)$$

Para h>=2,4mm aplica-se a expressão de Gallaway:

$$V_h \text{ (km/h)} = 4,974 \times B \quad (3)$$

Onde B é o máximo dos seguintes valores B1 e B2:

$$B1 = 12,639 / h^{0,06} + 3,507 \quad \text{com h (mm) e Aa(mm)=altura de areia do pavimento}$$

$$B2 = (22,351 / h^{0,06} - 4,97) \times Aa^{0,14}$$

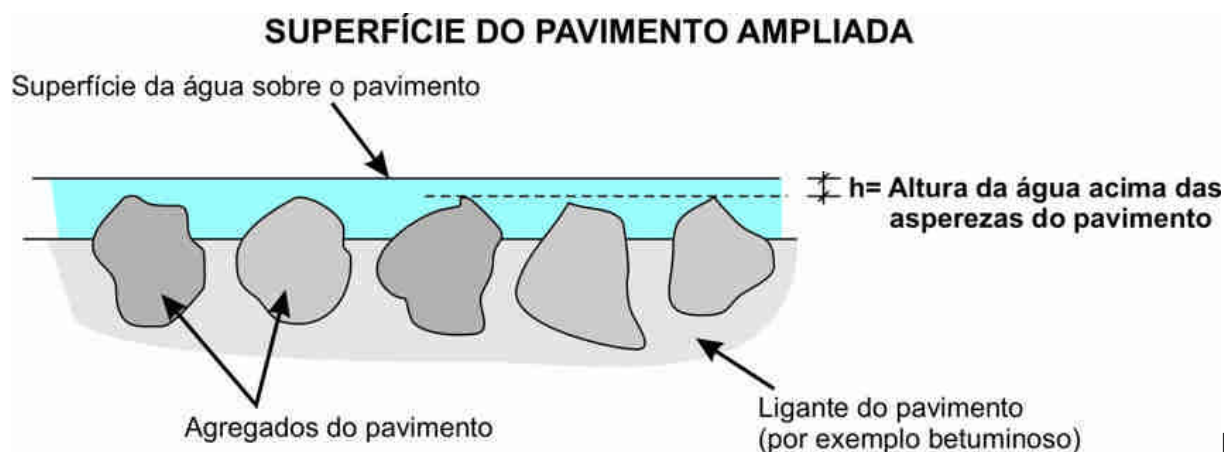


Fig.3

A formulação (2) e (3) foi apresentada em 1985 por Huebner, R.S. et al (13) e, em 1988, foi considerada na tese do Prof. França (11).

Estas expressões (2) e (1) baseiam-se nos resultados de 1038 casos de início de hidroplanagem e estabeleceram-se por correlações entre a velocidade de hidroplanagem e as variáveis já mencionadas. Os coeficientes de correlação encontrados foram de 85% para a expressão (2) e de 82% para a expressão (1) - (11) Prof. Adalberto França, pág.159.

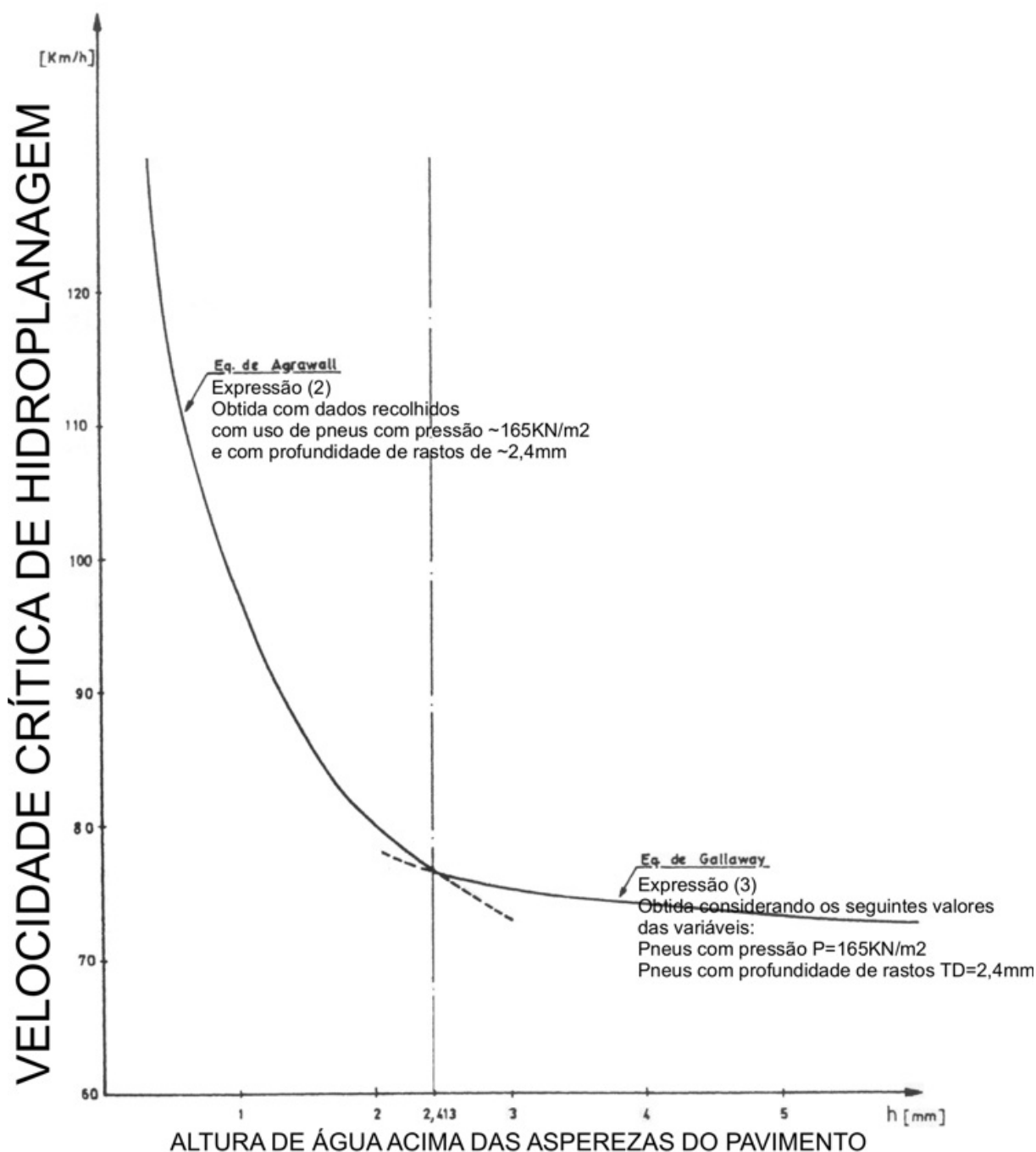


Fig. 5.1 - Representação gráfica das expressões de Agrawal e Gallaway

Gráfico extraído da tese de doutoramento do Prof. Adalberto França, pág. 160 e complementado com notas pelo autor do presente artigo

Fig.4

3 – CÁLCULO DO COMPRIMENTO E DA INCLINAÇÃO DA LINHA DE ÁGUA

Durante a ocorrência de uma chuvada, a água, que cai sobre o pavimento impermeável¹ da estrada, drena segundo as pendentes desta superfície, ao longo de percursos que designaremos por Linhas Fluxo de Água ou, simplesmente, por Linhas de Água, tal como se representa nos vários casos da figura seguinte:

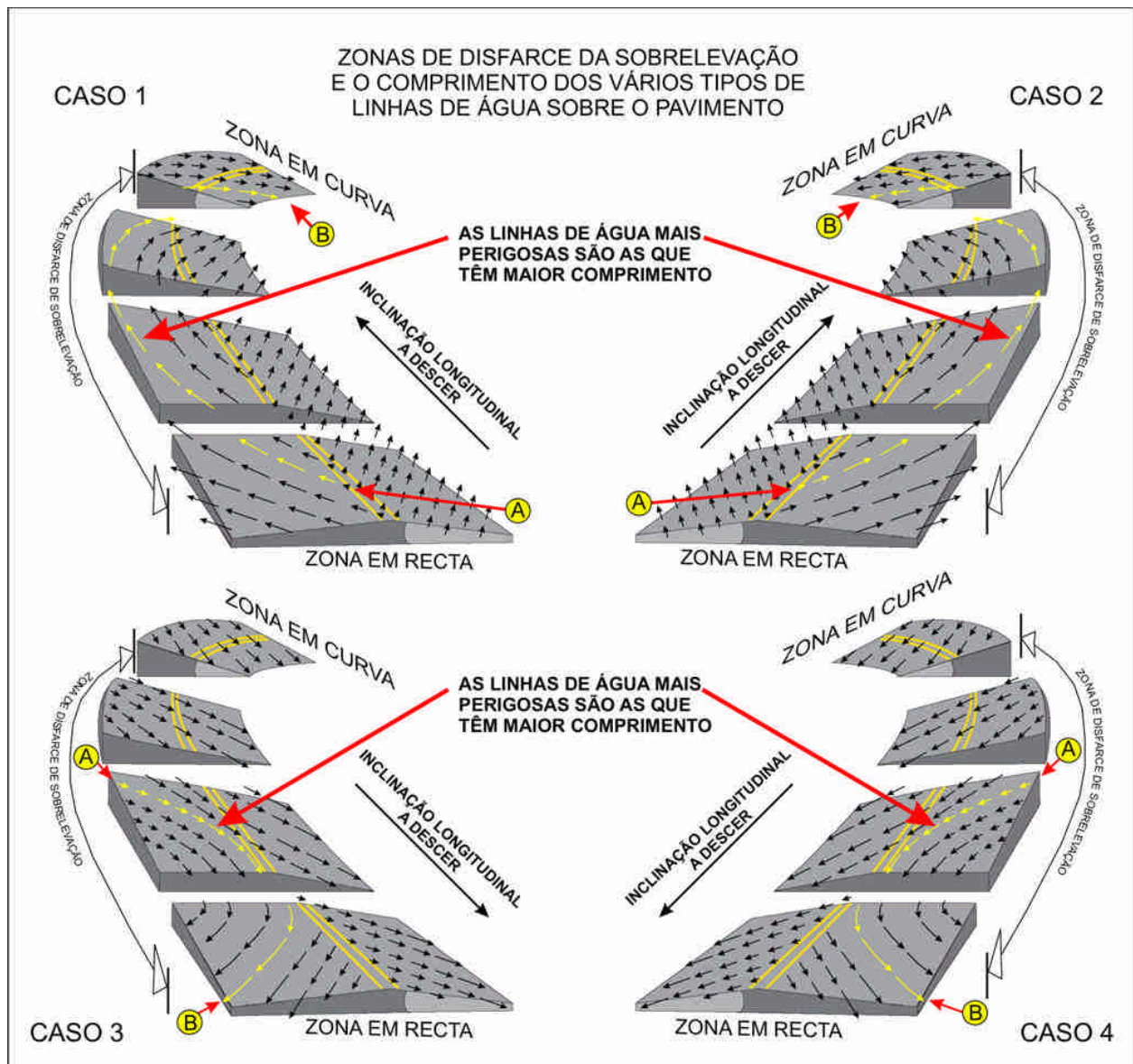


Fig.5

As zonas de disfarce de sobrelevação mais perigosas são as que existem antes e depois de percorrer curvas para a esquerda, tal como se mostra na figura 5. Em algumas destas circunstâncias a inexistência de drenagem longitudinal no eixo da estrada pode aumentar, ainda mais, o comprimento das Linhas de Água, como se observa nos casos 1 e 2 da figura 5.

¹ - Deve-se considerar que os pavimentos correntes (não drenantes) são impermeáveis, tal como consta também na bibliografia consultada.

Na imagem seguinte podemos observar e compreender a influência do comprimento da Linha de Água na contribuição para a geração da hidroplanagem parcial e da hidroplanagem total.

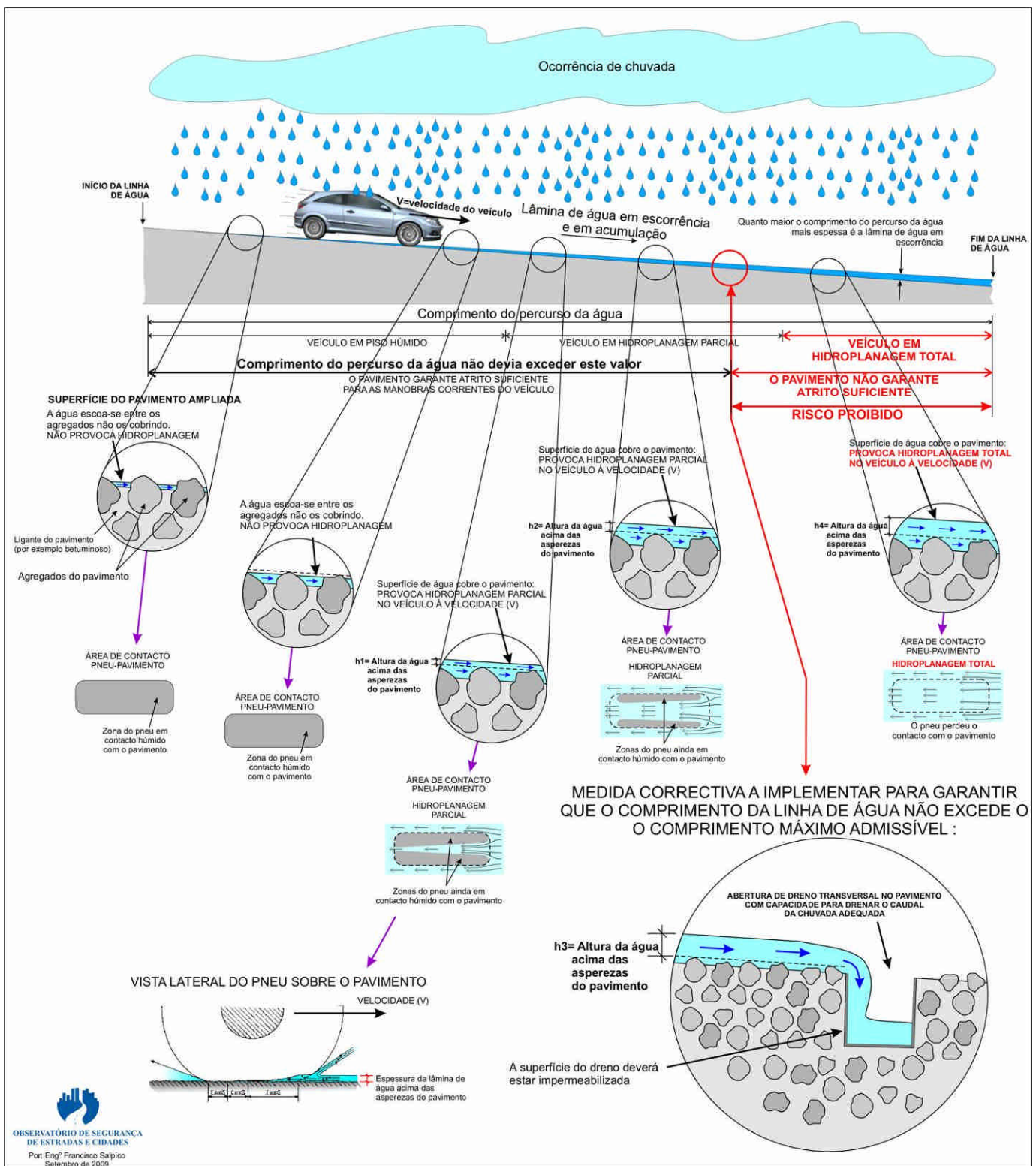


Fig.6

No troço inicial da Linha de Água, a água pluvial vai escorrendo entre os agregados do pavimento e, como ainda não os cobre, não é possível gerar-se hidroplanagem dinâmica no veículo.

À medida que aumenta o percurso de escorrência das águas pluviais, o caudal das águas captadas ao longo desse percurso vai sendo cada vez maior e, a partir dum certo comprimento, os agregados do pavimento são cobertos pela água em escorrência, dando origem a lâmina que já é responsável por provocar hidroplanagem parcial nos pneus do veículo.

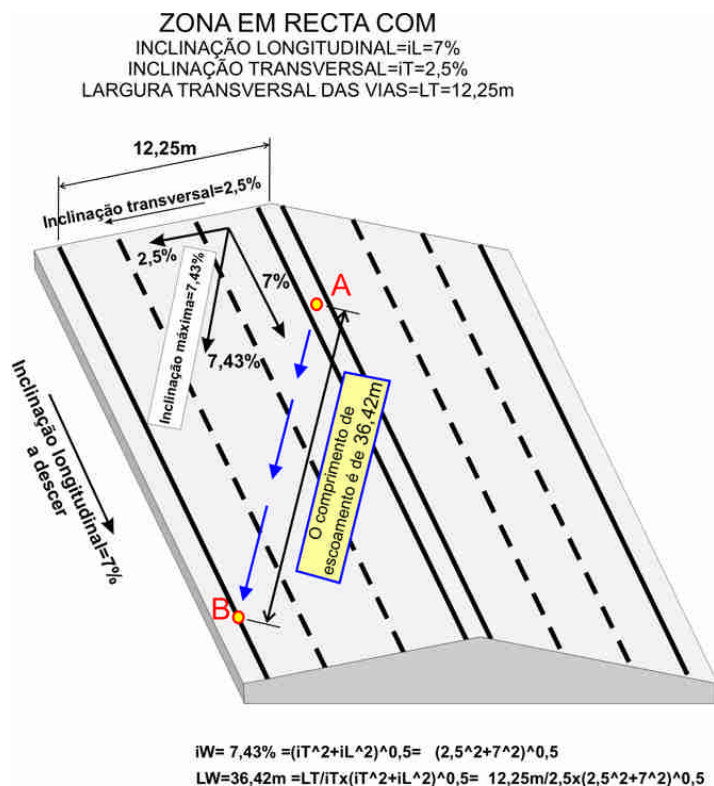
A partir de um certo comprimento da Linha de Água a espessura da lâmina de água, que escorre acima das asperezas do pavimento, já provoca hidroplanagem total no veículo a deslocar-se à velocidade V.

Todo o comprimento excessivo da Linha de Água que ultrapassa o início da ocorrência da hidroplanagem total constitui um manto de água ao longo do qual o veículo se deslocará com total perda do domínio da direcção e, esta situação, corresponde ao perigo concreto para a vida dos utentes da estrada.

Também podemos perceber que quanto mais salientes estiverem os agregados do pavimento (o que corresponde a um pavimento com maior macrorugosidade ou maior Altura de Areia) maior será o comprimento em que a água circulará entre os agregados, sem os cobrir e, por isso, tanto maior será a extensão de pavimento que garante a segurança contra a hidroplanagem.

Assim, torna-se determinante conhecer o percurso e a inclinação das linhas de escorrência das águas pluviais sobre o pavimento da estrada.

--- CASO 1 ---

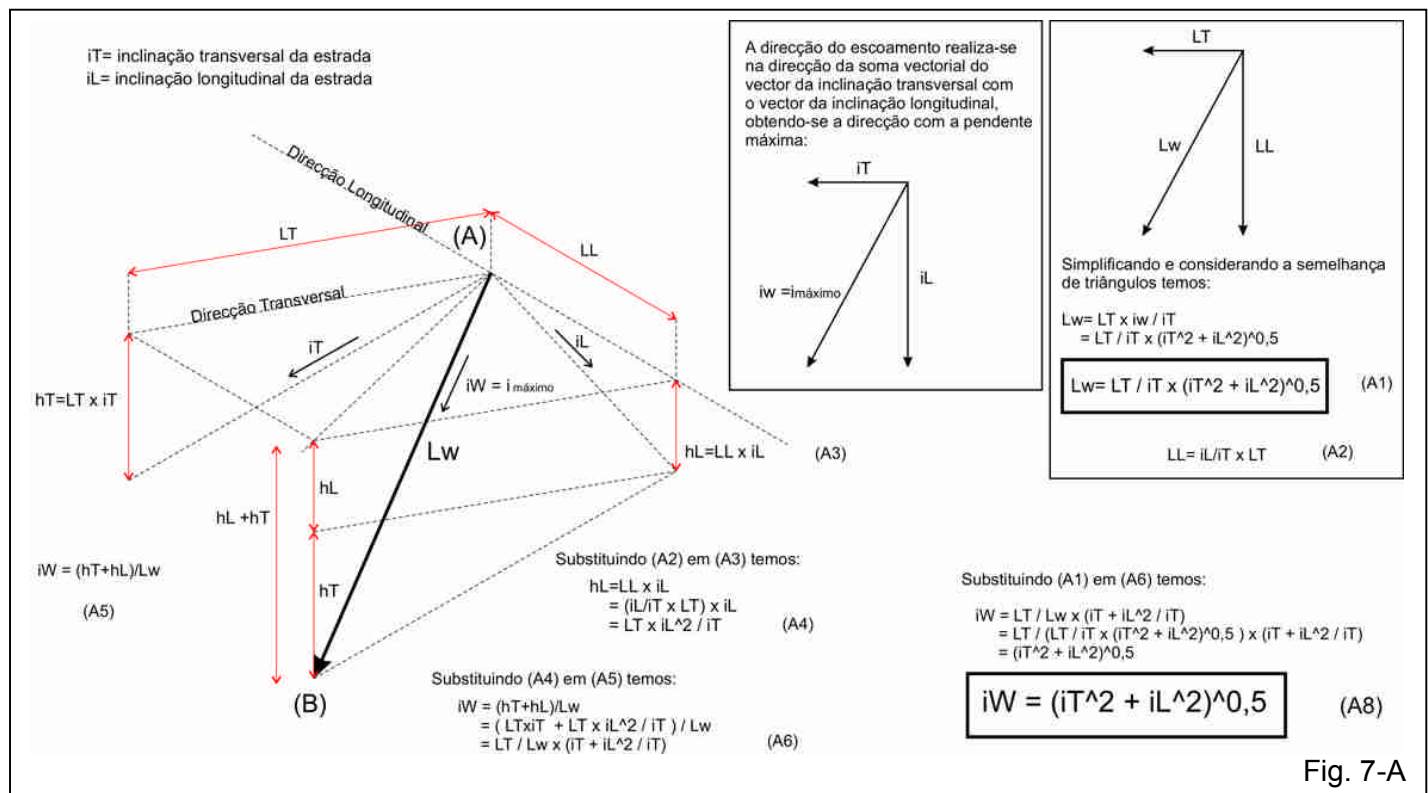


De seguida apresentamos o exemplo de cálculo do comprimento máximo da Linha de Água (L_W) e da sua inclinação (i_W) numa estrada com 3 vias em cada sentido, num troço em recta com a inclinação longitudinal de 7%:

- COMPRIMENTO DA LINHA DE ÁGUA A-B= $L_W=36,42m$
- INCLINAÇÃO DA LINHA DE ÁGUA A-B= $i_W=7,43\%$

Fig.7

De seguida apresenta-se a demonstração das expressões para cálculo de L_w e i_w :



$$\text{Comprimento da linha de água A-B} = L_w = \frac{L_T}{i_T} \times (i_T^2 + i_L^2)^{0,5} \quad (4A)$$

$$\text{Inclinação da linha de água A-B} = i_w = (i_T^2 + i_L^2)^{0,5} \quad (4B)$$

onde:

$L_T(m)$ = largura da faixa de rodagem desde o ponto (A) até ao ponto (B). É a largura da superfície ao longo da qual as linhas de água se desenvolvem, desde o seu início (A) a montante (ver fig.7).

i_L = inclinação longitudinal da estrada

i_T = inclinação transversal da estrada

(se a inclinação é, por exemplo, de 2% então toma-se 0,02)

A expressão (4B) é a recomendada pela diversa bibliografia tal como, por exemplo, na ref. (9)-pag.8.

Num caso recente, que ocorreu nos nossos Tribunais, o queixoso apresentou um Relatório Preliminar onde se demonstrava que uma zona perigosa de disfarce de sobrelevação, na auto-estrada A8, era causal à hidroplanagem mesmo na ocorrência de chuvas fracas e médias.

A concessionária dessa auto-estrada defendeu-se, com a apresentação de um parecer emitido pelo Departamento de Transportes do LNEC, (8)-Proc.0703/72/17192, assinado pelo responsável

Engº Lemonde de Macedo e pelo Engº João Cardoso (chefe do Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança Rodoviária do LNEC) que, apreciando o referido Relatório Preliminar, estes engenheiros do LNEC, deram a entender que a metodologia de cálculo da inclinação da linha de água, efectuado pela expressão (4B), estava errada (ver ref.(8)-pág.30). Nesse parecer, o LNEC apresentou a metodologia, que considera correcta, para o cálculo da inclinação da linha de água, cuja expressão é:

$$i_{w_{LNEC}} = (i_L + i_T) \times 100 / (100^2 + 100^2)^{0,5}$$

onde:

i_L = inclinação longitudinal da estrada; i_T = inclinação transversal da estrada
(se a inclinação é, por exemplo, de 2% então toma-se 0,02)

e, aqueles engenheiros, apresentam o seguinte exemplo:

$$i_L = 4\%; i_T = 2,5\% \quad i_{w_{LNEC}} = (4 + 2,5) / (100^2 + 100^2)^{0,5} = 4,60\%$$

Contudo, esta metodologia do LNEC é incorrecta, tal como se demonstra facilmente por absurdo.

Por exemplo, no caso de termos $i_L = 0\%$ e $i_T = 2,5\%$ isso quereria dizer que a linha de água desenvolver-se-ia na direcção transversal da estrada e teria a inclinação $i_W = i_T = 2,5\%$ mas, pela metodologia do LNEC, teríamos

$$i_{w_{LNEC}} = (0,025 + 0,00) \times 100 / (100^2 + 100^2)^{0,5} = 0,01768 = 1,768\% \text{ o que não faz sentido.}$$

Outro exemplo pode ser o caso de $i_L = 7\%$ e $i_T = 2,5\%$ e, por aquela metodologia teríamos

$$i_{w_{LNEC}} = (0,025 + 0,07) \times 100 / (100^2 + 100^2)^{0,5} = 0,06718 = 6,718\%$$

o que, também não faz sentido pois isso significava que a água iria correr, não pela pendente máxima de 7%, mas por uma pendente inferior de 6,718%.

A expressão correcta para cálculo de (i_w) é a (4B).

4 – CÁLCULO DA ALTURA DE ÁGUA ACIMA DAS ASPEREZAS DO PAVIMENTO

Para um dado percurso de uma Linha de Água, com um comprimento (L_w), com uma pendente (i_w), durante a ocorrência de uma chuvada com intensidade (i), o caudal de água acumulado ao longo desse comprimento (L_w) é dado por: $\text{Caudal} = Q = (L_w) \times (i) / 3600000$, com Q [m^3/s], L_w [m] e i [mm/h].

Galloway, em 1979 - por (10), (9) -, com base em resultados experimentais de escorrência de água pluvial sobre diversos tipos de pavimentos (de betão betuminoso e de betão de cimento) apresentou a seguinte expressão para o cálculo da altura de água acima das asperezas:

$$h_{\text{Galloway}} = 0,01485 \times [Aa^{0,11} \times Lw^{0,43} \times i^{0,59} / iw^{0,42}] - Aa \quad (4)$$

onde :

h_{Galloway} (mm) = altura de água acima das asperezas do pavimento. A altura total de água, em escoamento sobre o pavimento, é de $Aa + h_{\text{Galloway}}$

Aa (mm)=macrorugosidade do pavimento medida pelo ensaio da altura de areia

i_w = pendente da linha de água (m/m)

L_w (m) = comprimento da linha de água

i (mm/h) = intensidade da chuvada. Os pavimentos correntes (não drenantes) devem ser considerados impermeáveis. Caso o pavimento tenha alguma permeabilidade J (mm/h) que importe considerar, então deve-se usar a seguinte correcção:

$$i(\text{mm/h}) = (\text{intensidade da chuvada}) - J$$

Quando h_{Galloway} apresentar valor negativo (por exemplo $h_{\text{Galloway}} = -0,1\text{mm}$ com $Aa = 0,4\text{mm}$) isso significa que o caudal se escoar entre os agregados, sem os cobrir, com uma altura média de água, entre os agregados, de $Aa + h_{\text{Galloway}}$ ($=0,4+(-0,1)=0,3\text{mm}$). Nesta situação não se gera hidroplanagem dinâmica.

Anderson et al (14), em 1998, com base em resultados experimentais de escorrência de água pluvial sobre diversos tipos de pavimentos, apresentou a formulação para o cálculo da altura de água acima das asperezas, para cada um desses tipos de pavimento (de betão betuminoso impermeável, de betão de cimento e de betão betuminoso drenante). Esta moderna formulação, para cada tipo de pavimento, já contempla a temperatura da água e revela-se mais adequada uma vez que a formulação (4) de Galloway se aplicava tanto para pavimentos de betão betuminoso (não drenante) como para pavimentos de betão de cimento.

Pela inerente economia do presente artigo, que limita a sua extensão, não apresentamos a formulação de Anderson et al (14), que será tratada noutra ocasião mas, nos vários exemplos de cálculo, iremos apresentar a correspondente altura de água acima das asperezas do pavimento, calculada segundo Anderson et al (14), com a referência (h_{Anderson}).

Retomando o exemplo do CASO 1, e considerando ainda os seguintes elementos, podemos calcular a velocidade crítica de hidroplanagem no Ponto (B) da estrada:

- o pavimento é em betão betuminoso não drenante, com macrorugosidade de Altura de Areia de 0,7mm- aceite pelas instituições públicas que têm a tutela sobre a segurança rodoviária das estradas em Portugal;
- Ocorrência de uma chuvada frequente com intensidade de $i=43\text{mm/h}$ (com duração de 5 minutos, que se verifica 1,75 vezes por ano, na maior parte do País (região A), como adiante se referirá);
- Pressão frequente de enchimento dos pneus dos veículos ligeiros= $P=200\text{KN/m}^2$;
- Profundidade dos rastos dos pneus= $TD=2,4\text{mm}$ (superior ao mínimo admissível em Portugal, de 1,6mm)

O cálculo da altura da água, acima das asperezas do pavimento, no ponto (B) do pavimento, é dado por (4):

$$Lw=36,42\text{m} ; iw=7,43\%=0,0743; i=43\text{mm/h} ; Aa=0,7\text{mm} ;$$

$$\begin{aligned} h_{\text{Gallaway}} &= 0,01485 \times [Aa^{0,11} \times Lw^{0,43} \times i^{0,59} / iw^{0,42}] - Aa \\ &= 0,01485 \times [0,7^{0,11} \times 36,42^{0,43} \times 43^{0,59} / 0,0743^{0,42}] - 0,7 \\ &= 1,1365\text{mm} \end{aligned}$$

Pela formulação moderna de Anderson et al, específica para este tipo de pavimento, apresentamos a altura de água no ponto (B) para o caso da temperatura ambiente de 10°C e de 20°C:

$$h_{\text{Anderson } T=10^\circ\text{C}} = 1,857\text{mm}$$

$$h_{\text{Anderson } T=20^\circ\text{C}} = 1,787\text{mm}$$

A velocidade crítica de hidroplanagem (V_h) pode-se calcular pela expressão (1) de Gallaway, considerando a altura de água já calculada e ainda as seguintes características relativas aos pneus do veículo ligeiro $P=200\text{KN/m}^2$; $TD=2,4\text{mm}$:

$$V_h = 0,9143 \times SD^{0,04} \times P^{0,3} \times (TD + 0,794)^{0,06} \times B \quad (1)$$

Onde B é o máximo dos seguintes valores:

$$B1 = 12,639 / h_{\text{Gallaway}}^{0,06} + 3,507 = 12,639 / 1,1365^{0,06} + 3,507 = 16,049$$

$$B2 = (22,351 / h_{\text{Gallaway}}^{0,06} - 4,97) \times Aa^{0,14} = (22,351 / 1,1365^{0,06} - 4,97) \times 0,7^{0,14} = 16,372$$

Assim, toma-se o valor máximo de $B=16,372$ e (V_h) tem o seguinte valor:

$$V_h = 0,9143 \times 10^{0,04} \times 200^{0,3} \times (2,4 + 0,794)^{0,06} \times 16,372 = 86,2 \text{ m/h}$$

No quadro seguinte comparamos os valores da Velocidade Crítica de Hidroplanagem no ponto (B), de acordo com as duas metodologias de cálculo de (h) :

$L_w=36,42\text{m}$; $i_w=7,43\%=0,0743$; $i=43\text{mm/h}$; $Aa=0,7\text{mm}$; **$P=200\text{KN/m}^2$** ; **$TD=2,4\text{mm}$**

Pressão= $P=200\text{KN/m}^2$ Prof.rastos= $TD=2,4\text{mm}$	$h_{\text{Gallaway}} = 1,137\text{mm}$ obtida pela formulação antiga (4)	$h_{\text{Anderson } T=10^\circ\text{C}} = 1,857\text{mm}$ (formulação mais completa)	$h_{\text{Anderson } T=20^\circ\text{C}} = 1,787\text{mm}$ (formulação mais completa)
Velocidade Crítica de Hidroplanagem por (1) no ponto (B) do pavimento betuminoso	86,2 km/h A expressão (1) de Gallaway não se deve aplicar para (h) muito reduzido como neste caso, porque apresenta valores de (V_h) inferiores aos reais.	83,0km/h (TC=4,5minutos)	83,3km/h (TC=4,4minutos)

Por curiosidade, apresentamos agora os vários valores da Velocidade Crítica de Hidroplanagem, usando a expressão adequada (2) para esta altura de água (h) , considerando uma pressão mais baixa para os pneus (165KN/m^2) e uma profundidade dos rastos dos pneus de $2,4\text{mm}$, valores que são usados, na diversa bibliografia, para a verificação das condições de segurança, pela simples razão da disponibilidade de dados experimentais que permitem o cálculo da (V_h) para toda a gama de altura de água sobre os agregados do pavimento, pelas expressões (2) e (3):

$L_w=36,42\text{m}$; $i_w=7,43\%=0,0743$; $i=43\text{mm/h}$; $Aa=0,7\text{mm}$; **$P=165\text{KN/m}^2$** ; **$TD=2,4\text{mm}$**

Pressão= $P=165\text{KN/m}^2$ Prof.rastos= $TD=2,4\text{mm}$	$h_{\text{Gallaway}} = 1,137\text{mm}$ obtida pela formulação antiga (4)	$h_{\text{Anderson } T=10^\circ\text{C}} = 1,857\text{mm}$ (formulação mais completa)	$h_{\text{Anderson } T=20^\circ\text{C}} = 1,787\text{mm}$ (formulação mais completa)
Velocidade Crítica de Hidroplanagem pela expressão (2) no ponto (B) do pavimento	93,73km/h	82,5km/h (TC=4,5minutos)	83,4km/h (TC=4,4minutos)

Como se pode comparar dos dois últimos quadros, a expressão (1) de Gallaway, para alturas de água (h) da ordem ou inferior a 2mm , apresenta valores de (V_h) mais conservativos, inferiores aos reais, tal como o valor de $V_h=86,2$ do 1º quadro, por a pressão dos pneus ser mais elevada

($P=200\text{KN/m}^2$), deveria ser superior ao do 2º quadro $V_h=93,73$ (com $P=165\text{KN/m}^2$), o que não acontece.

Considerando os cálculos da Altura de Água segundo Anderson et al, o tempo que as águas pluviais demorarão a percorrer o referido percurso, desde o ponto (A) até ao ponto (B), é cerca de 4,5 minutos (TC =tempo de concentração no ponto B). Deste modo, bastará a ocorrência de uma chuvada frequente com intensidade de 43mm/h e com duração de, pelo menos, 4,5 minutos, para formar o lençol de água que provocará hidroplanagem a partir da velocidade de $82,5\text{ km/h}$ (com $T=10^\circ\text{C}$) ou $83,4\text{ Km/h}$ (com $T=20^\circ\text{C}$).

Se essa chuvada durar menos do que 4,5 minutos, então a altura de água em escorrência sobre o pavimento, no ponto (B), poderá não chegar a atingir o valor calculado.

Se essa duração for muito inferior a 4,5 minutos então nem sequer será formado o lençol de água capaz de provocar hidroplanagem no ponto (B).

Se essa chuvada durar mais do que 4,5 minutos, então a altura de água em escorrência sobre o pavimento, no ponto (B), atingirá o valor calculado de $1,857\text{mm}$ (com $T=10^\circ\text{C}$) ou $1,787\text{mm}$ (com $T=20^\circ\text{C}$) e manterá esse valor enquanto durar a chuvada com aquela intensidade.

O **tempo de concentração** (TC) de um comprimento total de escoamento poderá ser estimado como a soma dos tempos de escoamento dos vários troços que compõem esse comprimento total. Neste artigo, para estimar o Tempo de Concentração, considerámos o percurso total composto por três troços, o que é pouco, mas estamos desenvolver o software para aumentar o nº de troços que compõem o escoamento.

O **tempo de concentração** (TC) de um comprimento total de escoamento pode ser estimado pela expressão (5) de Harwood et al , 1988, citada em (16), pág.20:

$$TC = 6,99007 \times Lw^{0,6} \times n^{0,6} / (i^{0,4} \times iw^{0,3}) \quad (5)$$

Onde :

TC = tempo de concentração (minutos)

Lw = comprimento da linha de água (m)

n = coeficiente de Manning que caracteriza o escoamento na linha de água. Os autores da expressão referem que este coeficiente apresenta valores entre 0,01 e 0,05. Este valor é calculado, de forma muito específica, pela formulação de Anderson et al (14). Cada troço de escoamento, que compõe o percurso total, é caracterizado por um determinado coeficiente de Manning. Para a utilização desta expressão parece que talvez seja mais correcto a utilização do coeficiente de Manning médio de todo o percurso.

i = intensidade da chuva (mm/h)

i_w = inclinação média da linha de água (se é 2% toma-se 0,02)

Exemplo: $LW=30m$; $i_w=2\%$, $Aa=0,5mm$; $i=7mm/h$; $T=20^\circ C$; $P=165KN/m^2$; $TD=2,4mm$; Pavimento em betão betuminoso. Vamos considerar 3 troços de escoamento, $LW=Lw1+Lw2+Lw3=10m+10m+10m$ e, por Anderson et al (14), obtemos os seguintes resultados:

- No fim do 1º troço temos : $Lw1=10m$; $n1=coef.Manning=0,049$; $h_{Anderson\ T=20^\circ C} = 0,290mm$; $Vh=133,5Km/h$; $TC1=6,8minutos$
- Considerando o caudal que vem do 1º troço, obtemos no fim do 2º troço: $n2=coef.Manning=0,044$; $h_{Anderson\ T=20^\circ C} = 0,614mm$; $Vh=109,9Km/h$; $TC1+TC2=11,5minutos$
- Considerando o caudal que vem do 2º troço, obtemos no fim do 3º troço: $n3=coef.Manning=0,041$; $h_{Anderson\ T=20^\circ C} = 0,862mm$; $Vh=100,7Km/h$; $TC1+TC2+TC3=TC=15,4minutos$

Usando a expressão (5) e o coef.Manning médio= $(0,049+0,044+0,041)/3=0,0446667$ obtemos:

$$TC=6,99007 \times Lw^{0,6} \times n^{0,6} / (i^{0,4} \times i_w^{0,3})=6,9907 \times 30^{0,6} \times 0,0446667^{0,6} / (7^{0,4} \times 0,02^{0,3})=12,4 \text{ minutos}$$

Contudo, se em vez de se considerar os 3 troços, apenas se considerar um troço com $Lw=30m$, por Anderson et al (25), obtemos:

$$n=coef.Manning=0,04058; h_{Anderson\ T=20^\circ C} = 0,862mm; Vh=100,7Km/h; TC=11,7minutos$$

Nestas condições de cálculo com um só troço, pela expressão (5), obtemos sempre um tempo (TC) igual ao calculado acima:

$$TC=6,99007 \times Lw^{0,6} \times n^{0,6} / (i^{0,4} \times i_w^{0,3})=6,9907 \times 30^{0,6} \times 0,04058^{0,6} / (7^{0,4} \times 0,02^{0,3})=11,7 \text{ minutos}$$

--- CASO 2 ---

Considerando outro caso, por exemplo, numa auto-estrada, circulando de Norte para Sul, existe a zona de disfarce de sobrelevação que surge após percorrer a CURVA 1 para a esquerda, com as seguintes características correntes e onde assinalamos as extensas linhas de água que se desenvolvem sobre o pavimento durante uma chuvada:

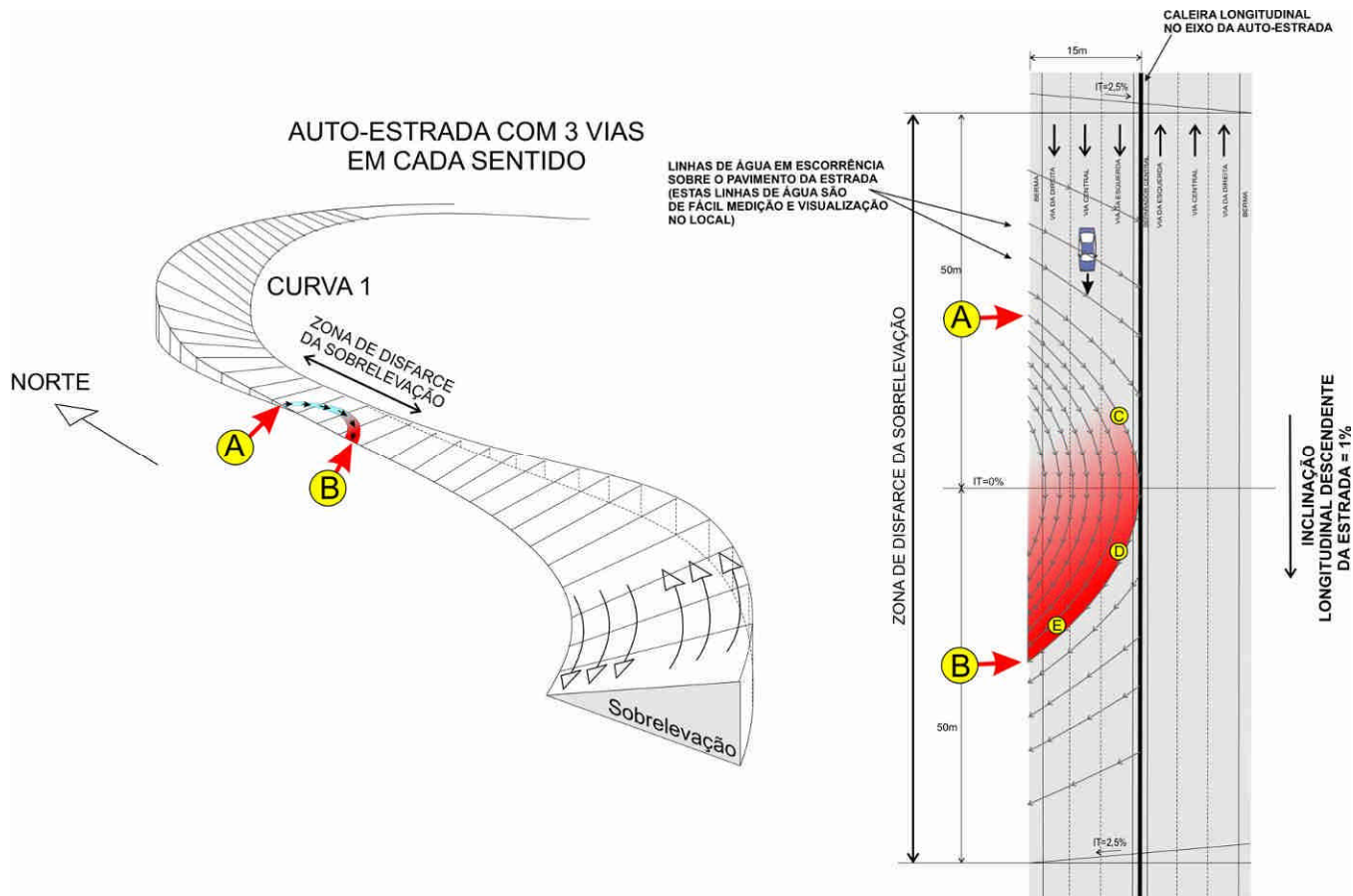


Fig.8

Com as inclinações definidas quer longitudinal, quer transversalmente, e com a largura da plataforma da estrada podemos calcular geometricamente as seguintes características:

- o comprimento da Linha de Água (A-B) = $L_w = 59,36\text{m}$
- a inclinação média da Linha de Água (A-B) = $i_w = 1,2381\%$

Considerando que o pavimento é em betão betuminoso corrente (impermeável, não drenante), com macrorugosidade de Altura de Areia de $A_a = 0,75\text{mm}$ – o qual é aceite, incorrectamente, pelas instituições públicas que têm a tutela sobre a segurança rodoviária das estradas em Portugal –, podemos calcular a velocidade crítica de hidroplanagem, em várias zonas do pavimento, durante a

ocorrência de uma chuvada com intensidade média de 13mm/h, muito frequente, e que por isso não deveria colocar em perigo de hidroplanagem os utentes da estrada.

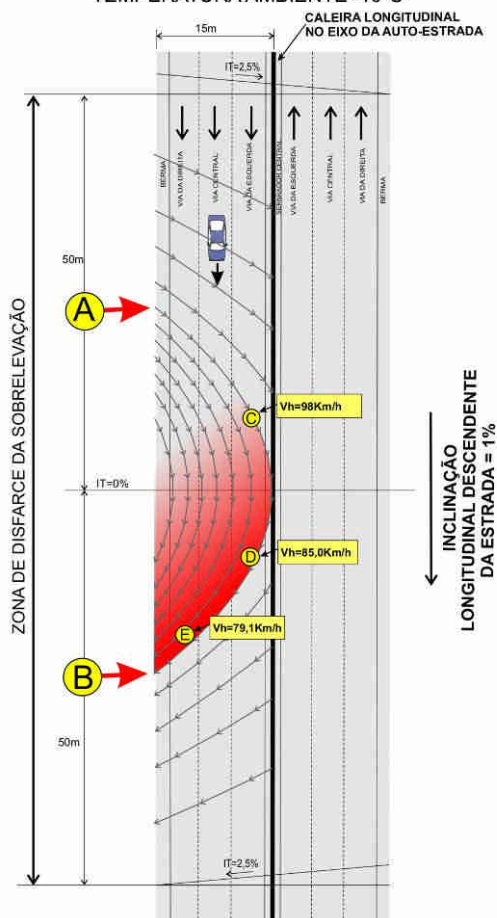
Note-se que, na disciplina da Hidrologia, uma chuvada é considerada fraca até à intensidade de 5mm/h e é considerada uma chuvada forte para intensidades entre 15 e 20 mm/h.

Considerando um veículo com pneus com pressão $P=165\text{KN/m}^2$ e com ranhuras, no rasto, com profundidade de $TD=2,4\text{mm}$, pela expressão (2) ou (3) temos as seguintes velocidades críticas de hidroplanagem (V_h) nas várias zonas do pavimento:

$$iw=1,2381\%=0,012381; Aa=0,75\text{mm}; P=165\text{KN/m}^2; TD=2,4\text{mm}; i=13\text{mm/h}$$

	Lw (m)	iw médio (%)	h_{Galloway} (mm)	h_{Anderson} $T=10^\circ\text{C}$ (mm)	h_{Anderson} $T=20^\circ\text{C}$ (mm)	V_h Pela expressão (2) com h_{Galloway} (Km/h)	V_h Pela expressão (2) com h_{Anderson} $T=10^\circ\text{C}$ (Km/h)	V_h Pela expressão (2) com h_{Anderson} $T=20^\circ\text{C}$ (Km/h)	Tempo de Concentração Por h_{Anderson} (minutos)
Zona (C)	Lw A-C=18	1,2381	0,682	0,956	0,910	107,0	98,0	99,3	10 ($T=10^\circ\text{C}$) 9,8 ($T=20^\circ\text{C}$)
Zona (D)	Lw A-D=36	1,2381	1,180	1,655	1,590	92,8	85,0	85,9	14,0 ($T=10^\circ\text{C}$) 13,8 ($T=20^\circ\text{C}$)
Zona (E)	Lw A-E=54	1,2381	1,547	2,191	2,111	86,5	79,1	79,9	17,3 ($T=10^\circ\text{C}$) 16,8 ($T=20^\circ\text{C}$)

PRESSÃO DE ENCHIMENTO DOS PNEUS=165KN/m²
 PROFUNDIDADE DOS RASTOS DOS PNEUS=2,4mm
 ALTURA DE AREIA DO PAVIMENTO=0,75m
 CHUVADA DE 13mm/h COM DURAÇÃO MÍNIMA DE 18 MINUTOS
 TEMPERATURA AMBIENTE=10°C



Como se verifica, o tempo necessário para formar o lençol de água, com as lâminas de água (h) previstas, desde o ponto (A) até ao ponto (E) é, cerca, de 18 minutos. Uma chuvada com intensidade de 13mm/h e com duração mínima de 18 minutos ocorre, na maior parte do território nacional (região A), mais do que 2,8 vezes por ano sendo, por isso, uma chuvada frequente.

Um evento assim tão frequente não deveria colocar em perigo a vida dos utentes da estrada e, como se verifica, já desde 1985 se podia concluir que, numa auto-estrada, mesmo na ocorrência de chuvadas frequentes com intensidade média de 13mm/h e que durassem, pelo menos 18 minutos, a hidroplanagem poderia surgir para a prática de velocidades da ordem de 86,5 km/h. Desde 1998 que poderíamos saber que a hidroplanagem em (E) ocorreria a partir de 79,1km/h.

Fig.9

Repare-se que, na Zona (C), a situação seria ainda mais grave porque a hidroplanagem podia ocorrer para velocidades a partir de 98km/h, mas com mais frequência, se atendermos ao tempo de concentração de cerca de 10 minutos. Com efeito, uma chuvada de 13mm/h e com tempo mínimo de duração de 10 minutos é uma chuvada mais frequente, que ocorre 3,6 vezes por ano, na maior parte do território nacional (região A).

Como veremos adiante, pela expressão (6) de Ivey e pelo Quadro 1, só na ocorrência de chuvadas muito mais intensas, cerca de 64mm/h, é que o condutor, a 100km/h, estaria no limiar da visibilidade adequada sobre a estrada.

Sob essa chuvada média de 13mm/h e se não circularem outros veículos próximos, um condutor, mesmo que reduza a velocidade para 110 ou para 100km/h, disporá ainda de boas condições de visibilidade sobre a estrada.

Contudo, se essa chuvada frequente de 13mm/h durar, pelo menos, 18 minutos, então estará criado o perigoso lençol de água em escorrência entre a zona (A) e a zona (E) que irá ameaçar a vida dos utentes da estrada, de forma totalmente proibida, por a hidroplanagem total ocorrer para velocidades a partir de 79Km/h quando os condutores ainda têm a tendência de praticar velocidades superiores porque ainda dispõem de boa visibilidade.

As regras técnicas exigem que as características do pavimento das estradas só deveriam permitir Velocidades Críticas de Hidroplanagem em ocasiões de chuvadas muito intensas, a partir de velocidades para as quais, os condutores, pelo seu comportamento padrão, tenham tendência a não praticar devido à redução da visibilidade sobre a estrada, como veremos adiante.

É ilícita a conduta do engenheiro² que, ao serviço da defesa do interesse público, aceita a concepção, a construção e a manutenção duma estrada em condições profundamente deficientes, onde a Velocidade Crítica de Hidroplanagem é inferior à velocidade que se espera que seja praticada pelos condutores, sendo reconhecido que essa velocidade é induzida, no universo dos condutores, pelas características da estrada e que estes reduzem a velocidade, consoante certa regra, pela diminuição da visibilidade associada à intensidade de chuvada.

² - Sobre este aspecto recomenda-se o estudo dos artigos do Juiz de Direito Dr. Nuno Pires Salpico, que constam na obra "ACIDENTES DE VIAÇÃO – RESPONSABILIDADE CIVIL E CRIMINAL POR DEFEITOS DE CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO DAS ESTRADAS", edição da Livraria Petrony.

5 - VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA CONTRA A HIDROPLANAGEM

5.1 - A ESCOLHA DA CHUVADA

De acordo com a generalidade dos estudos existentes, os condutores têm tendência a reduzir a velocidade durante a ocorrência de uma chuvaada.

O Prof. Eng^o Civil Adalberto França, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, na sua tese³ de doutoramento (11)-1988, atendendo aos diferentes tipos de chuva [de acordo com a classificação de Lenard, citada por A. Lencastre e M. Franco (17)] e por J. Lucas (18) e baseando-se na bibliografia consultada, considerava (reconhecendo o carácter subjectivo desta escolha) que a verificação da segurança contra a hidroplanagem poderia ser realizada adoptando as seguintes intensidades de precipitação:

- França pressupunha que, em estradas onde a velocidade fosse da ordem de 80Km/h (admitimos que se referia à Velocidade de Tráfego ou V85), haveria redução de velocidade, por parte dos condutores, quando ocorresse uma chuvaada de 24,1 mm/h (aguaceiro violento que pode ocorrer 2, 3 ou 4 vezes por ano, durante 20 minutos);

- França pressupunha ainda que, em estradas onde a velocidade fosse da ordem de 100Km/h (admitimos que se referia à Velocidade de Tráfego), haveria redução de velocidade, por parte dos condutores, quando ocorresse uma chuvaada de 15,8 mm/h (chuva forte que pode ocorrer 2, 3 ou 4 vezes por ano durante 30 minutos), (11)-pág.205.

Na comunidade internacional, quer nos EUA, ou noutros países, as intensidades das chuvaadas a considerar, para a verificação da segurança, são muito mais intensas:

- Na Nova Zelândia, a autoridade rodoviária "TRANSIT NEW ZEALAND" considera que a chuvaada escolhida para fazer a verificação da segurança deve corresponder ao período de retorno de 2 anos e que ocorra durante 5 minutos (que corresponde a 80mm/h) (9). Em Portugal corresponderia às seguintes chuvaadas: 80mm/h (Região A); 64mm/h (Região B); 96mm/h (Região C);

- A autoridade rodoviária "QUEENSLANDS MAIN ROADS" considera que a chuvaada máxima deverá ser de 50mm/h, baseando-se na respectiva redução da visibilidade (9);

- A autoridade rodoviária "WESTERN AUSTRALIA MAIN ROADS" considera que a chuvaada máxima deverá ser de 50mm/h, baseada no período de retorno de 1 ano com duração de 5 minutos (9). Em Portugal corresponderia às seguintes chuvaadas: 61mm/h (Região A); 49mm/h (Região B); 73mm/h (Região C);

Do estudo dos acidentes em piso molhado, Ivey et al, em 1975-(19), identificaram três factores que participam na sinistralidade: Atrito entre os pneus e o pavimento, a visibilidade disponível durante a chuvaada e a velocidade adoptada pelos condutores.

Desse estudo, Ivey et al concluíram que a resposta do condutor, que se manifesta na velocidade praticada, é afectada pela visibilidade disponível durante a ocorrência de uma determinada chuvaada.

³ - O estudo da tese do Prof. França foi determinante para se perceber, com profundidade, as restantes bibliografias consultadas. Este Professor desenvolveu um software para cálculo e desenho das Linhas de Fluxo de Água sobre o pavimento.

Assim, Ivey et al com base no comportamento verificado dos condutores, em experiências realizadas para o efeito, propuseram uma expressão que relaciona a Velocidade Praticada com a Intensidade da Chuvada e com a Distância de Visibilidade Disponível nessas condições:

$$DV (m) = 354407,276 / (i^{0,68} \times V) \quad (6)$$

onde:

DV(m)= Distância de visibilidade disponível ao condutor

i = Intensidade da chuvada (mm/h)

V = velocidade praticada (Km/h)

Esta expressão tenta aproximar-se do comportamento real do condutor e não considera a influência da circulação próxima de outros veículos, cujo efeito de “spray” reduziria a visibilidade do condutor (14).

Nesta expressão, Ivey recomenda que, para a velocidade de 94km/h, se considere a chuvada máxima de 80mm/h, associada à correspondente Distância Mínima de Visibilidade, tal como defendeu, com detalhe, na ref. bibliográfica (19) de 1975.

A importância e a validade desta expressão já foi reconhecida e passou a constar nas normas norte-americanas, AASHTO highway design guides (14)-1998, pag.66.

A escolha da intensidade da chuvada, para verificar a segurança contra a hidroplanagem, circulando a uma determinada velocidade, será feita por forma a garantir a Distância de Visibilidade, tal como se recomenda em (9)pag.9 ou em (14)pag.A-31 e A-32, de acordo com a resposta esperada do condutor, como se mostra no seguinte Quadro 1, baseado também no trabalho de Hayers et al (20), usando a expressão (6):

QUADRO 1 – Relação Velocidade / Intensidade da Chuvada utilizando a expressão (6)

Velocidade que os condutores têm tendência a manter na ocorrência da chuvada (i), dispondo ainda das condições mínimas de visibilidade sobre a estrada (Km/h)	Distância de Visibilidade a garantir, de acordo com a AASHTO (normas norte-americanas) (m)	Intensidade da Chuvada a considerar i (mm/h)	Classificação da chuvada Por (17)-Lencastre *
80	145	151	Tempestade Violenta *
88	167	106	Tempestade Violenta *
96	198	73	(Tempestade)
104	221	55	(Chuva Muito Forte)
112	259	39	(Chuva Muito Forte)

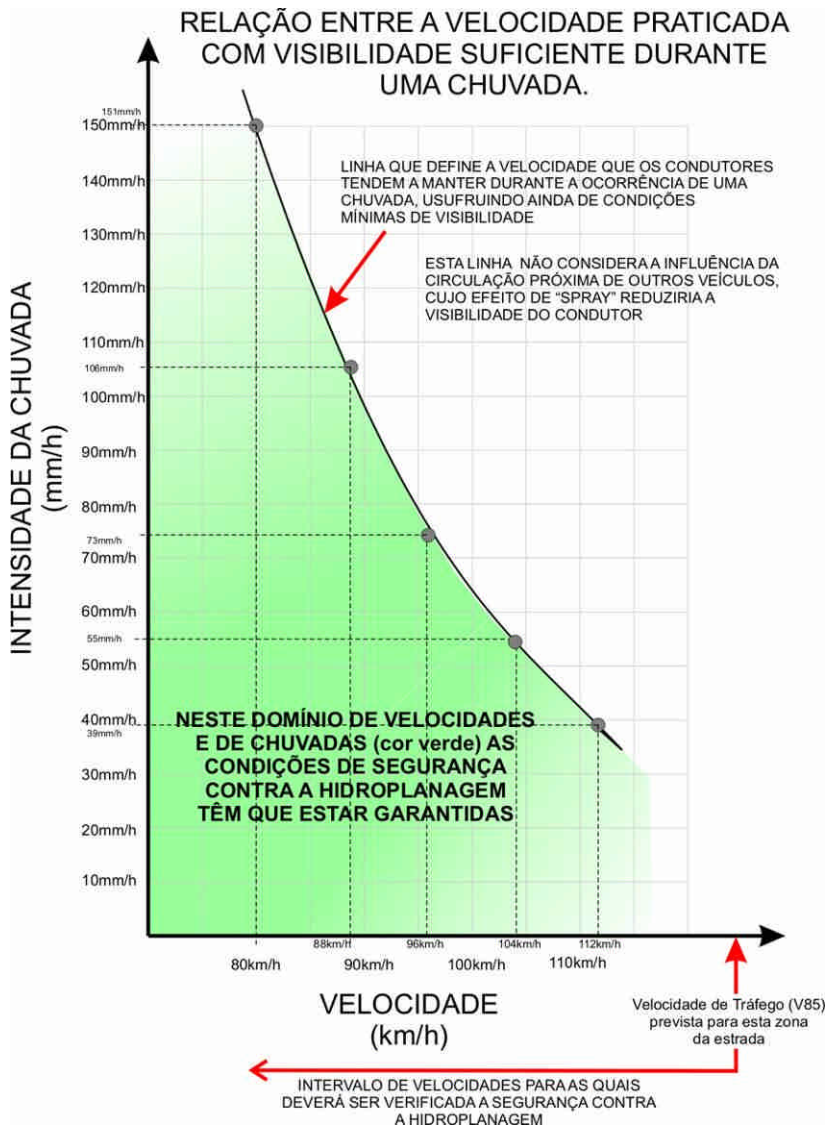


Fig.10

Os condutores têm tendência a reduzir/ajustar a velocidade conforme a visibilidade disponível pela intensidade da chuvada, de acordo com a expressão (6).

A gama de velocidades a considerar na verificação da segurança serão as velocidades inferiores à Velocidade de Tráfego (V85)⁴ que se estima para a zona da estrada em estudo.

Deste modo, para a ocorrência de cada intensidade de chuvada prevista no Quadro 1, a Velocidade Crítica de Hidroplanagem no pavimento da estrada deverá ser superior à Velocidade que os condutores têm tendência a praticar e, sendo essas chuvadas prováveis, temos que as considerar na verificação da segurança.

Contudo, convém verificar se as chuvadas previstas no Quadro 1 têm uma probabilidade aceitável de ocorrerem. Não se devem utilizar chuvadas que, por serem muito intensas, são excessivamente raras para ocorrer.

---- O Risco Aceitável de Ocorrer a Hidroplanagem ----

A consideração da ocorrência de chuvas muito intensas tem que estar associada a uma probabilidade aceitável desse evento se realizar.

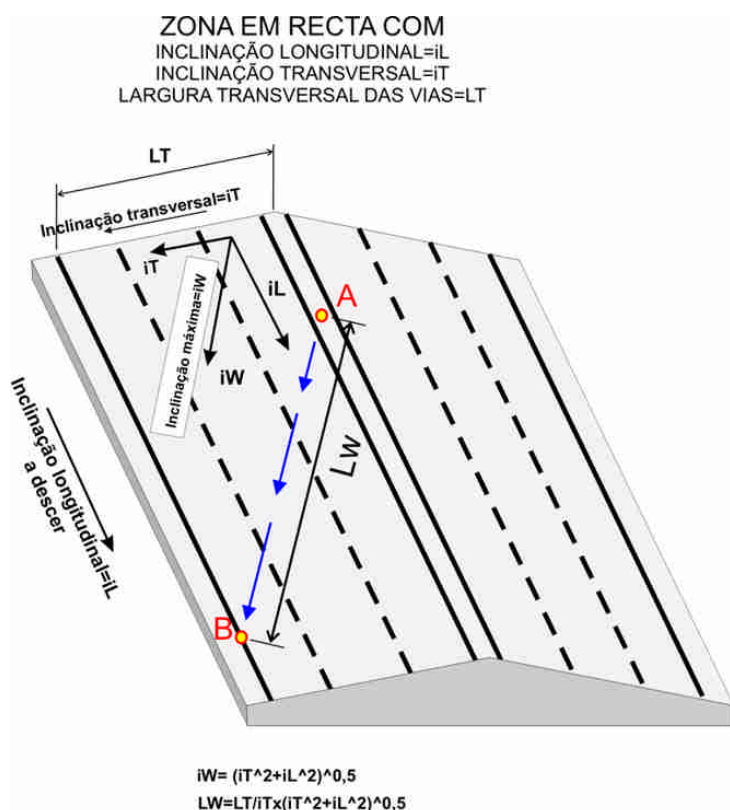
Reed, Huebner et al (12) em 1985, baseando-se nos trabalhos de Gallaway e Ivey consideraram razoável a adopção de chuvadas com probabilidades 1% a 3% de serem excedidas ao longo de um

⁴ - Para uma estimativa mais adequada da Velocidade de Tráfego (V85) que o universo de condutores a proteger é induzido a praticar, influenciado pelas características do traçado, não se deverá usar a Norma de Traçado Portuguesa que, neste aspecto, é significativamente contra a segurança, mas dever-se-ão utilizar recursos mais adequados, tais como os sugeridos no artigo do autor, publicado no volume nº3 desta revista "TECNOLOGIA E VIDA" da ANET Norte.

Esta estimativa da V85 é da maior importância porque se a Velocidade de Tráfego medida na estrada (já construída) for superior à Velocidade de Tráfego estimada na fase de projecto isso pode corresponder a defeitos de traçado graves, ilicitamente causais à génese de zonas de acumulação de acidentes.

ano, o que corresponde a chuvadas com períodos de retorno de $T=100$ anos e $T=30$ anos, respectivamente, (21)-pág.6.

Posteriormente, em 1998, Reed, Huebner, Anderson et al (14), consideraram adequado que se utilizem intensidades de chuva que tenham a probabilidade, o risco, de 1% de serem excedidas ao longo de um ano, o que corresponde a chuvadas que podem ocorrer de 100 e 100 anos (período de retorno de $T=100$ anos) ⁵.



- COMPRIMENTO DA LINHA DE ÁGUA A-B= LW
- INCLINAÇÃO DA LINHA DE ÁGUA A-B= iW

Fig.11

---- Duração da Chuvada ----

Para uma dada intensidade de chuva, a altura da lâmina de água calculada para o ponto (B) do pavimento da estrada, só atingirá esse valor, após decorrido algum tempo desde o início da chuvada.

Com efeito, a água da chuva, uma vez precipitada sobre o pavimento, o seu escoamento levará algum tempo desde o ponto (A) até chegar ao ponto (B) – **é o tempo de concentração desse ponto B** - onde, nesse instante, a espessura da lâmina de água no ponto B será a espessura calculada.

Deste modo, quando se pretende verificar a segurança em relação à ocorrência de hidroplanagem no Ponto B, temos de utilizar uma chuvada com um tempo de duração que não seja inferior ao tempo de concentração, por forma a permitir que a água precipitada no ponto A consiga atingir o ponto B.

Para se estudar a situação noutro ponto da linha de água deverá calcular-se o tempo de

concentração desde a origem em (A) até esse ponto.

--- Escolha da Intensidade da Chuvada com Base no Risco, no Tempo de Concentração e na Visibilidade do Condutor -----

Não pretendendo definir exactamente o nível de risco proibido, sabemos, pelas referências anteriores, que chuvadas com probabilidade (de ocorrer durante um ano) superior a 3%, isto é, com períodos de retorno inferiores a 30 anos, têm que ser consideradas na análise da segurança contra a hidroplanagem.

⁵ - Probabilidade da chuvada ser excedida ao longo de um ano (%) = $100 / (\text{Período de Retorno})$

Considerando o limite do risco, indicado no último estudo de **Anderson, D.A., Huebner, R.S., Reed, J.R., Warner, J.C. e Henry J.J. (14)**, de não exceder a probabilidade de 1% de ocorrer durante um ano, estamos a definir que as chuvadas a considerar deverão ter um tempo de retorno de $T=100$ anos ($1/(1\%) = 1/0,01 = 100$ anos).

Para as várias regiões pluviométricas de Portugal ((15)-pág.349 e Dec.Regulamentar nº 23/95 de 23 de Agosto-Diário Rep.1ªsérie-B) a intensidade da precipitação com o período de retorno $T=100$ anos é definida, em função da duração da precipitação, pelas seguintes expressões :

$$\text{- Região A } \dots i = 365,62 \times t^{-0,508} \quad (7)$$

$$\text{- Região B } \dots i = 292,50 \times t^{-0,508} \quad (8)$$

$$\text{- Região C } \dots i = 438,75 \times t^{-0,508} \quad (9)$$

Onde :

i = intensidade da precipitação (mm/h)

t = duração da precipitação (minutos)

Como já se referiu, a **duração da precipitação** não deverá ser inferior ao **tempo de concentração** do local do pavimento da estrada onde se pretende verificar a segurança contra a ocorrência de hidroplanagem.

Da intensidade da chuvada calculada com base no risco (por uma das três expressões anteriores consoante a região A, B ou C onde se situa a estrada) e da intensidade da chuvada calculada com base na visibilidade (ver Quadro 1), os autores - **Anderson, D.A., Huebner, R.S., Reed, J.R., Warner, J.C. e Henry J.J. (14)** - , referem que a chuvada a adoptar deve ser, de entre as duas, a de menor valor (21)-pág.8.

Contudo, se estudarmos toda a tipologia das soluções correntes nas nossas estradas, com os seus pavimentos, com as larguras máximas de três vias em cada sentido, com as pendentes máximas e mínimas, constatamos que, a verificação da segurança contra a hidroplanagem corresponde a tempos de concentração de poucos minutos, ou seja, verificamos que todas as chuvadas previstas no Quadro 1 são chuvadas com períodos de retorno da ordem de 5 anos na maior parte do país (região A) e com período de retorno de 10 anos na zona menos chuvosa do país (região B). Isto significa que, no nosso país, a verificação à hidroplanagem é apenas condicionada pelas chuvadas previstas no Quadro 1 pois, todas elas são chuvadas prováveis a considerar.

REGIÕES PLUVIOMÉTRICAS

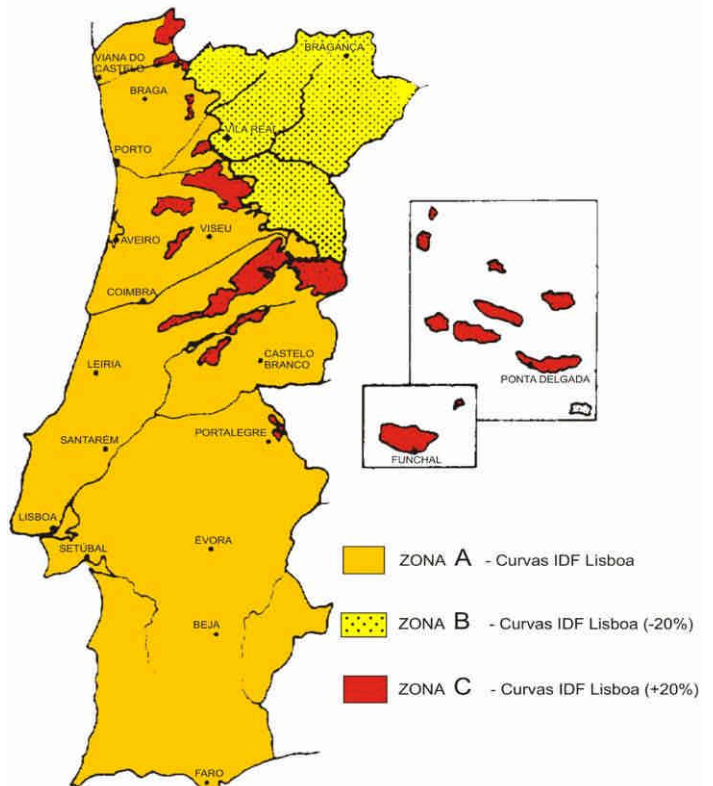


Fig.12

5.2 - CÁLCULO DA MACRORUGOSIDADE MÍNIMA A GARANTIR NO PAVIMENTO PARA VERIFICAR A SEGURANÇA CONTRA A OCORRÊNCIA DE HIDROPLANAGEM TOTAL

De seguida, com recurso a um exemplo, iremos apresentar os cálculos justificativos a desenvolver para definir a macrorugosidade -Altura de Areia (Aa)- mínima que o pavimento deverá apresentar para satisfazer a segurança necessária contra a ocorrência de hidroplanagem.

--- CASO 3 ---

Neste exemplo, a estrada localiza-se na proximidade de Faro (região pluviométrica A) e o seu pavimento é em betão betuminoso (figura 13).

- Cálculo de (Aa):

Com recurso a cálculo automático, utilizando as expressões (2) e (3) e calculando a espessura das lâminas de água na zona (B) de acordo com Anderson et al (14), considerando:

- as chuvadas previstas no Quadro 1;
- considerando a temperatura da água de 10°C (como recomenda Anderson et al (14), apesar de uma variação de alguns graus centígrados não ser significante);
- considerando $L_w=13,43m$ e $i_w=3,91\%$;
- $P=165KN/m^2$; $TD=2,4mm$
- para cada intensidade de chuva do Quadro 1, o valor da Altura de Areia mínimo é calculado por (2) e por (3), de modo iterativo, fazendo a igualdade:

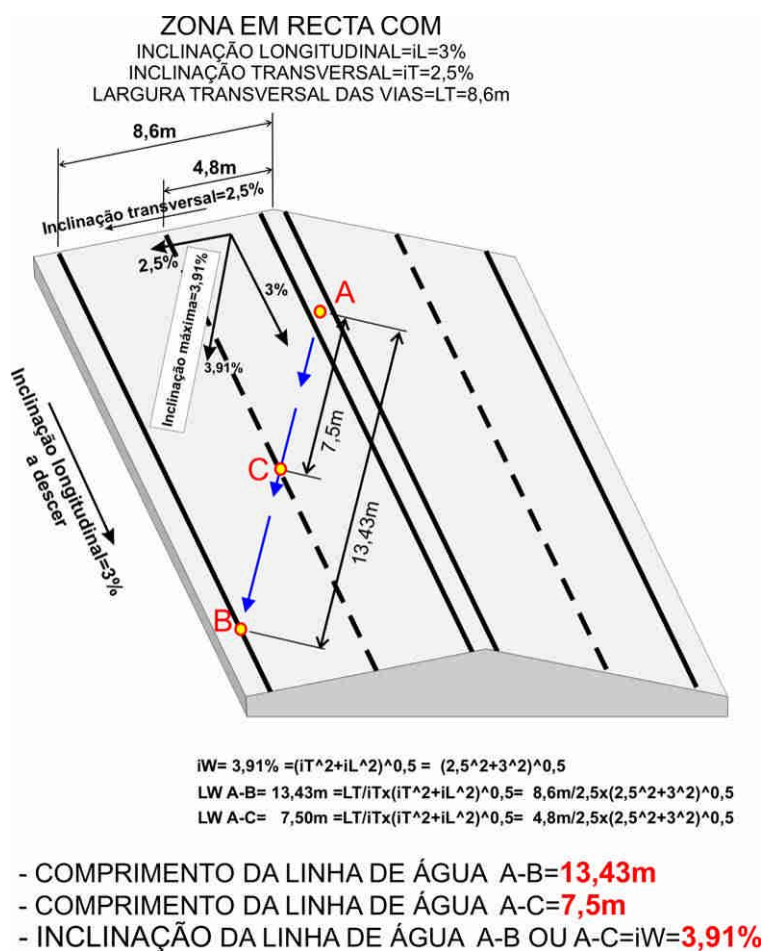


Fig.13

Velocidade Crítica de Hidroplanagem em (B) = Velocidade esperada do condutor, do Quadro 1

Do cálculo iterativo resulta o seguinte quadro:

Velocidade Crítica de hidroplanagem em (B) = Velocidade do condutor do Quadro 1 (Km/h)	Intensidade da Chuvada (i) a considerar do Quadro 1 (mm/h)	Altura de Areia (Aa) calculada para garantir a segurança contra a hidroplanagem (mm)	Tempo de Concentração Calculado (TC) (minutos)	Altura de água acima das asperezas (h) (mm)
80	151	0,97	1,9	2,553
88	106	1,51	2,2	1,447
96	73	1,42	2,7	1,038
104	55	1,38	3,1	0,756
112	39	1,23	3,7	0,571

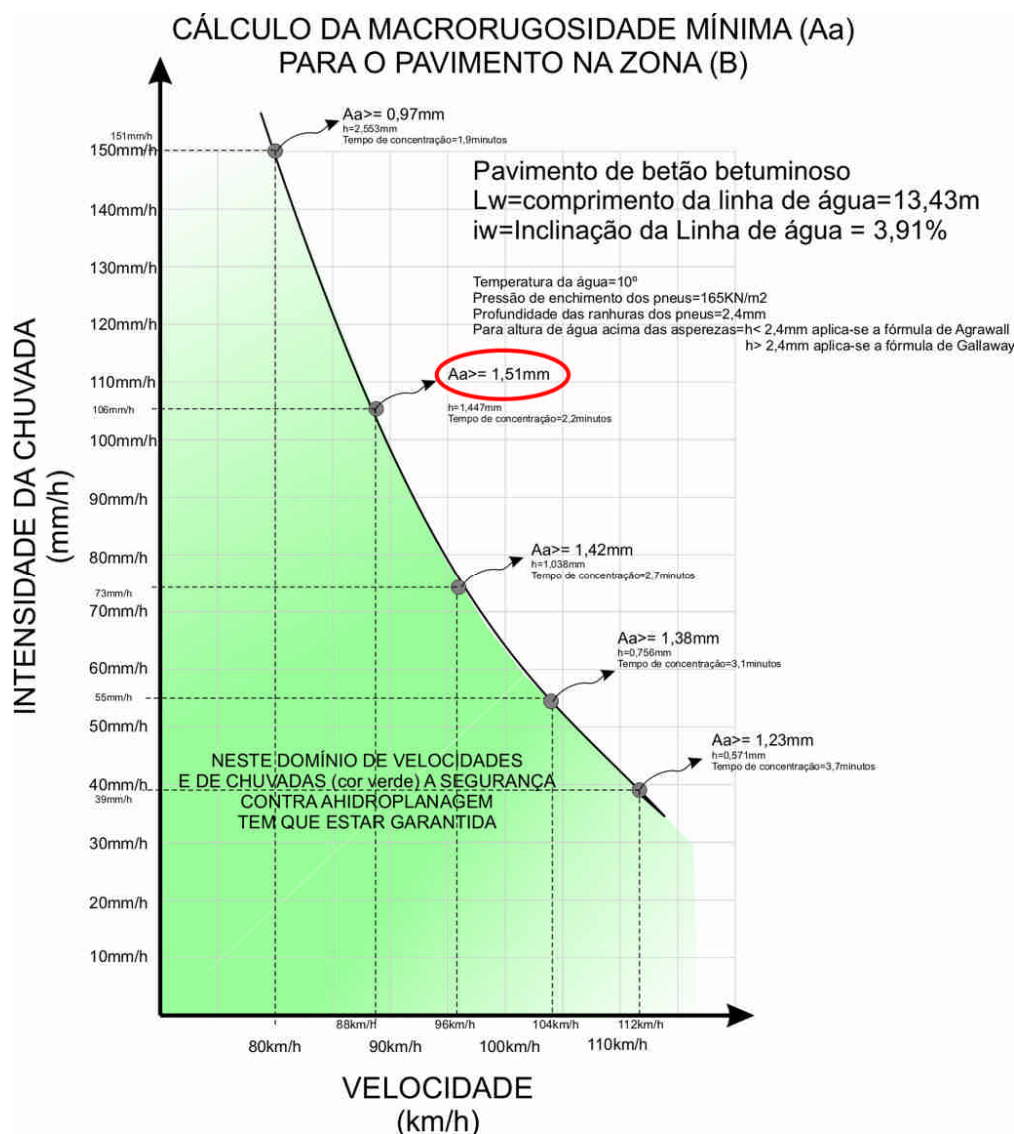


Fig.14

Como se observa na tabela acima, a condição mais gravosa do par (velocidade praticada pelo condutor ; intensidade da chuvada) verifica-se para V=88km/h e i=106mm/h, que determina o valor Mínimo para Altura de Areia (Aa=1,51mm) que esse pavimento poderá exibir para garantir a segurança para o leque de chuvadas a considerar.

Deste quadro podemos verificar que a ocorrência de uma chuvada menos intensa de, por exemplo, de 39mm/h exige uma macrorugosidade do pavimento muito superior (Altura de Areia=1,23mm) em relação à ocorrência de uma chuvada extremamente violenta de 151 mm/h que exige apenas uma Altura de Areia de 0,97mm.

Contudo, dos cálculos realizados convém verificar se essa chuvada condicionante de 106mm/h é aceitável. Para tal, calculamos a intensidade da chuvada com período de retorno de 100 anos e com duração de 2,2 minutos, com recurso à expressão (7)

$$i = 365,62 \times t^{-0,508} = 365,62 \times 2,2^{-0,508} = 244,95 \text{ mm/h}$$

Como esta chuvada de 244,95mm/h (com período de retorno de 100 anos), é superior à chuvada condicionada pelo comportamento do condutor (106mm/h) então deve-se escolher a de menor intensidade. Quer dizer que, esta última, é uma chuvada a considerar por ter um risco de ocorrer superior ao risco permitido e que, por isso, a segurança contra a hidroplanagem ainda deverá estar garantida.

Assim, a escolha desta última chuvada (106mm/h) para a verificação da segurança, é adequada, o que valida o valor obtido para Aa.

Em resumo: no referido troço de recta, com a inclinação longitudinal de 3%, o pavimento nunca deverá apresentar macrorugosidade com Altura de Areia inferior a 1,51mm.

Uma vez realizado o cálculo, com a formulação de Anderson et al (14), vamos apresentar, a título de exemplo, o cálculo da Altura de Areia necessária, relativa ao mesmo par (V=88km/h ; i=106mm/h), com recurso à expressão antiga (4) para o cálculo da espessura da lâmina de água sobre o pavimento (h_{Galloway}):

Assim, como 1ª iteração, toma-se, por exemplo, o seguinte valor Aa=1mm.

Com este valor vamos calcular a altura de água sobre o pavimento, no ponto (B), pela expressão (4):

$$\begin{aligned} h_{\text{Galloway}} &= 0,01485 \times [Aa^{0,11} \times Lw^{0,43} \times i^{0,59} / iw^{0,42}] - Aa = \\ &= 0,01485 \times [1^{0,11} \times 13,43^{0,43} \times 106^{0,59} / 0,0391^{0,42}] - 1 = \\ &= 1,773\text{mm} \end{aligned}$$

como $h < 2,4\text{mm}$ usamos a expressão (2) para cálculo da Vh:

$Vh \text{ (km/h)} = 96,899 \times h^{-0,259} = 96,899 \times 1,773^{-0,259} = 83,54\text{km/h}$ ---- esta velocidade deveria ser igual a 88km/h -relativo ao par (88km/h; 106mm/h)-, mas como resultou inferior isso significa que, para ser maior, temos que diminuir (h), o que corresponde a aumentar o valor de (Aa) para, por exemplo, Aa= 1,6mm:

Toma-se, como 2ª iteração, Aa=1,6mm

$$\begin{aligned} h_{\text{Galloway}} &= 0,01485 \times [Aa^{0,11} \times Lw^{0,43} \times i^{0,59} / iw^{0,42}] - Aa = \\ &= 0,01485 \times [1,6^{0,11} \times 13,43^{0,43} \times 106^{0,59} / 0,0391^{0,42}] - 1,6 = \\ &= 1,321\text{mm} \end{aligned}$$

como $h < 2,4\text{mm}$ usamos a expressão (2) para cálculo da Vh:

$Vh \text{ (km/h)} = 96,899 \times h^{-0,259} = 96,899 \times 1,321^{-0,259} = 90,17\text{km/h}$ ---- esta velocidade deveria ser igual a 88km/h -relativo ao par (88km/h; 106mm/h)-, mas como resultou superior isso significa que,

para ser menor, temos que aumentar (h), o que corresponde a diminuir o valor de (Aa) para, por exemplo, Aa= 1,4mm:

Toma-se, como 3ª iteração, Aa=1,4mm

$$\begin{aligned}
 h_{\text{Galloway}} &= 0,01485 \times [Aa^{0,11} \times Lw^{0,43} \times i^{0,59} / iw^{0,42}] - Aa = \\
 &= 0,01485 \times [1,4^{0,11} \times 13,43^{0,43} \times 106^{0,59} / 0,0391^{0,42}] - 1,4 = \\
 &= 1,478\text{mm}
 \end{aligned}$$

como $h < 2,4\text{mm}$ usamos a expressão (2) para cálculo da Vh:

$Vh \text{ (km/h)} = 96,899 \times h^{-0,259} = 96,899 \times 1,478^{-0,259} = 87,57\text{km/h}$ ---- esta velocidade deveria ser igual a 88km/h -relativo ao par (88km/h; 106mm/h)-, mas como resultou inferior isso significa que, para ser maior, temos que diminuir (h), o que corresponde a aumentar o valor de (Aa) para, por exemplo, Aa= 1,5mm:

Toma-se, como 4ª iteração, Aa=1,5mm

$$\begin{aligned}
 h_{\text{Galloway}} &= 0,01485 \times [Aa^{0,11} \times Lw^{0,43} \times i^{0,59} / iw^{0,42}] - Aa = \\
 &= 0,01485 \times [1,5^{0,11} \times 13,43^{0,43} \times 106^{0,59} / 0,0391^{0,42}] - 1,5 = \\
 &= 1,400\text{mm}
 \end{aligned}$$

como $h < 2,4\text{mm}$ usamos a expressão (2) para cálculo da Vh:

$Vh \text{ (km/h)} = 96,899 \times h^{-0,259} = 96,899 \times 1,400^{-0,259} = 88,81\text{km/h}$ ---- esta velocidade como já é próxima de 88km/h -relativo ao par (88km/h; 106mm/h)-, vamos considerar ter finalizado o cálculo iterativo e o valor da Altura de Areia fica estabelecido em Aa=1,5mm.

Note-se que, neste caso, o método antigo de cálculo de h_{Galloway} conduziu a resultados semelhantes de Aa em relação ao método moderno de cálculo de h_{Anderson} .

Os resultados finais da análise da segurança contra a ocorrência de hidroplanagem apresentam-se na seguinte imagem:



Fig.15

Uma vez realizado este tipo de cálculos para os vários troços da estrada onde se pretende intervir, o engenheiro civil, na função pública, deverá verificar se as peças desenhadas, do projecto

de execução em avaliação, apresentam, de modo claro, os valores mínimos de Altura de Areia que deverá caracterizar a macrorugosidade das várias zonas do pavimento rodoviário a executar.

Não podemos deixar de referir que a responsabilidade criminal sobre defeitos graves de projecto, que venham a colocar em perigo concreto a vida humana ou a causar mortes ou feridos graves, é, à luz do Direito, exclusiva dos agentes técnicos, administrativos e políticos do organismo público que aprovou esse projecto, com o qual, se executou a estrada perigosa. Esta responsabilidade criminal não recai sobre o autor do projecto elaborado numa empresa privada, que tem outro nível de responsabilidade⁶.

⁶ - Sobre este aspecto recomenda-se o estudo dos artigos do Juiz de Direito Dr. Nuno Pires Salpico, que constam na obra “ACIDENTES DE VIAÇÃO – RESPONSABILIDADE CIVIL E CRIMINAL POR DEFEITOS DE CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO DAS ESTRADAS”, edição da Livraria Petrony.

--- CASO 4 ---

Neste exemplo de uma situação corrente, a estrada localiza-se também na região pluviométrica A e o seu pavimento é em betão betuminoso não drenante.

O comprimento da Linha de água A-B é de 78,65m e a sua inclinação média é cerca de 4,12%.

Esta linha de água é tão extensa que não é possível resolver o

problema da hidroplanagem apenas com recurso à macrorugosidade do pavimento.

Com efeito, considerando a

extensão da linha de água até à zona (E),

$L_w A-E=74m$

a macrorugosidade necessária na zona (E) seria $Aa>4,6mm$ (com tempo de concentração de 6,3 minutos), obtida da seguinte tabela:

A dificuldade pode residir, entre outras, no facto de macrorugosidades da ordem de $Aa=4,6mm$ serem de difícil execução / manutenção.

Anderson et al (14) sugerem a solução de “encurtar” as linhas de água com recurso a drenos superficiais transversais ou longitudinais. No caso de serem longitudinais, seriam implantados na linha divisória entre vias.

Estes órgãos de drenagem (caleiras), embutidos no pavimento, iriam interceptar as linhas de água, encurtando-as aos valores adequados. Essas águas

Velocidade Crítica de Hidroplanagem em (E) = Velocidade do condutor do Quadro 1 (Km/h)	Intensidade da Chuva (i) a considerar do Quadro 1 (mm/h)	Altura de Areia (Aa) calculada, por Anderson et al (14), para garantir a segurança contra a hidroplanagem (mm)
80	151	1,64
88	106	2,55
96	73	4,60
104	55	4,14
112	39	3,56

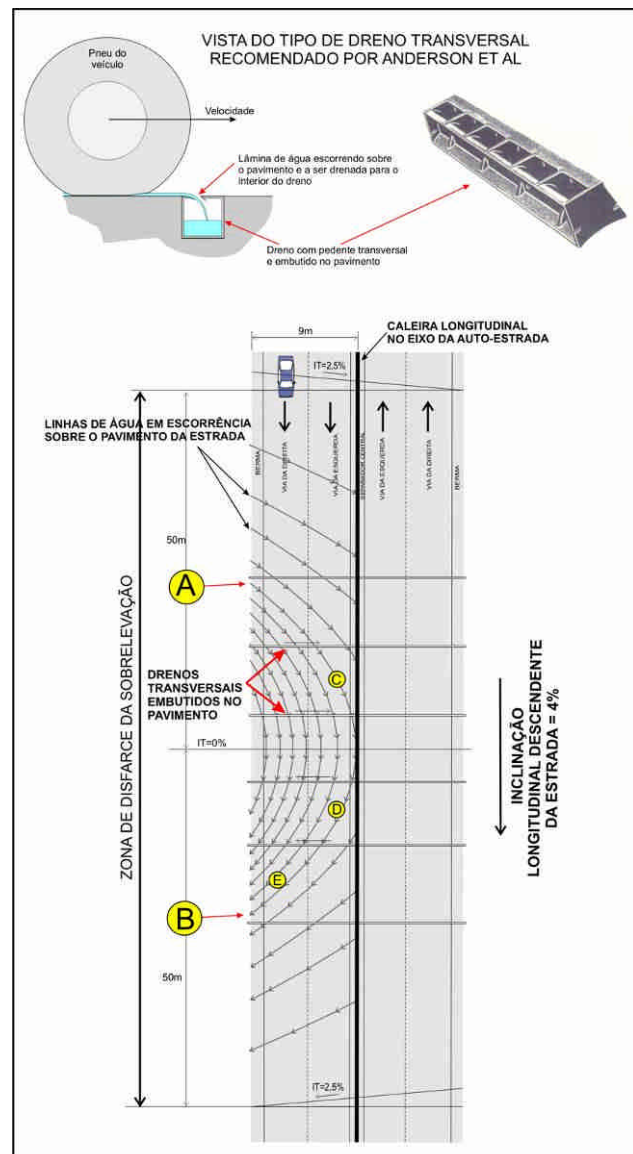


Fig.17

captadas seriam encaminhadas para as valetas existentes na periferia longitudinal da estrada (ver fig.17).

Contudo, este tipo de drenos, embutidos no pavimento, não são susceptíveis de serem executados com grande rapidez em estradas existentes e, além disso, Portugal não tem qualquer experiência na sua execução, na sua inspecção e manutenção (que se prevê não ser fácil) para que se possa lançar uma campanha de correcção em larga escala usando estes dispositivos.

Dada a extrema urgência da resolução da deficiência grave de drenagem superficial dos pavimentos das nossas estradas, com especial relevo para as auto-estradas, propomos a execução de drenos transversais, constituídos por “ranhuras” no pavimento, à semelhança das que têm sido realizadas por algumas concessionárias.

Temos observado que, essas ranhuras, executadas nos pavimentos, são claramente insuficientes:

- por não terem a secção mínima nem o devido afastamento entre si, para drenar os caudais necessários de águas pluviais;
- por estarem mal implantadas e em pouco número.

Perante uma chuvada média essas ranhuras ficam rapidamente inundadas, resultando inoperacionais, mantendo-se o grave perigo de ocorrência de hidroplanagem, tal como se pode demonstrar por cálculo.

5.3 - CÁLCULO DAS RANHURAS TRANSVERSAIS, A EXECUTAR NA SUPERFÍCIE DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS, PARA A GARANTIR A SEGURANÇA CONTRA A OCORRÊNCIA DE HIDROPLANAGEM TOTAL

A secção (largura e profundidade) de cada ranhura, a sua pendente e o afastamento entre as ranhuras têm que ser calculados para conseguirem drenar os caudais necessários sem, as ranhuras, ainda terem a sua secção cheia dentro da faixa de rodagem.

Se as ranhuras ficarem cheias, ainda na faixa de rodagem, isso significa que a lâmina de água, que vem de montante, passará sobre as ranhuras e continuará a provocar o perigo de hidroplanagem. Nesta situação, com a secção da ranhura cheia, ela perdeu a sua função de encurtar as linhas de água.

A tipologia das ranhuras agora proposta é a da seguinte imagem (fig.18):

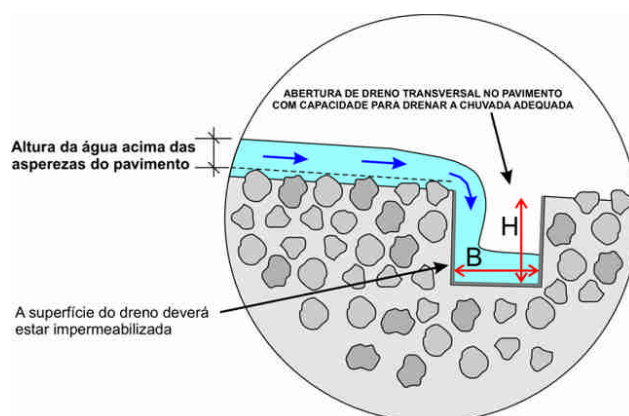


Fig.18

O caudal máximo que uma ranhura pode suportar, até ficar cheia, pode ser estimado pela fórmula de Manning-Strickler:

$$Q_{(m/s)} = K \times Sec \times Rh^{(2/3)} \times i_{ranhura}^{0,5} \quad (10)$$

Onde

K=coeficiente de Manning-Strickler é cerca de 70 a 80 considerando este tipo de superfície alisada pelo barramento para impermeabilização das faces da ranhura, de modo a impedir a eventual contaminação com água para as camadas inferiores do pavimento.

Sec=secção da ranhura =B x H com B(m) e H(m)

Rh=raio hidráulico da ranhura=Sec/(perímetro molhado da ranhura)=BxH/(2xH+B)

$i_{ranhura}$ =inclinação longitudinal do escoamento na ranhura que, na pior situação (ranhura sem inclinação longitudinal), é, no mínimo, da ordem de H/L

Por sua vez, o caudal recebido pela ranhura, ao longo do seu comprimento, é dado por:

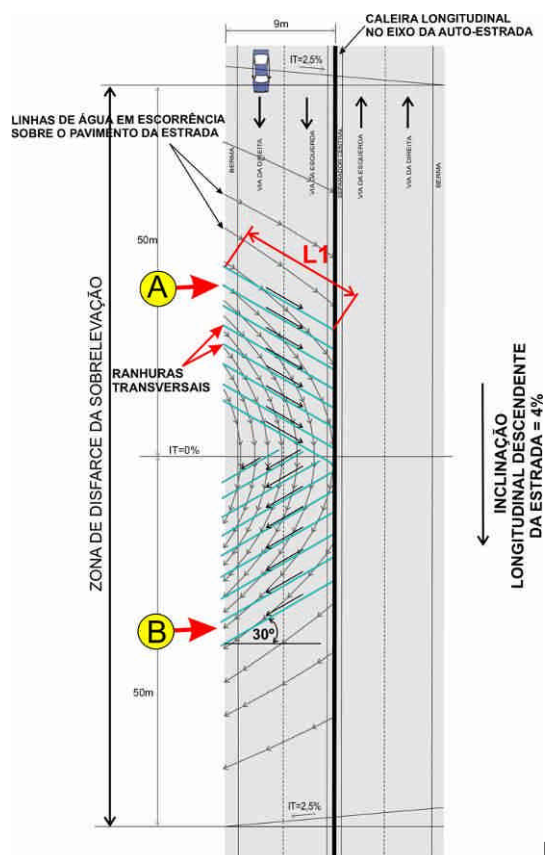
$$Q_{(m/s)} = L \times i_{chuvada} \times S / 3600000 \quad (11)$$

Onde:

L=comprimento da ranhura até ficar com a secção cheia (m)

$i_{chuvada}$ = intensidade da chuvada máxima a considerar e que vamos tomar como sendo de 151mm/h (ver Quadro 1)

S=espaçamento entre as ranhuras (m)



Igualando (10) a (11) obtemos a expressão para cálculo das dimensões da secção das ranhuras:

$$70 \times B \times H \times (B \times H / (2 \times H + B))^{(2/3)} \times (H/L)^{0,5} = L \times 151 \times S / 3600000$$

O comprimento máximo da ranhura até ficar cheia é dado por:

$$L = ((1668874,2 \times B \times H \times (B \times H / (2 \times H + B))^{(2/3)} \times H^{0,5}) / S)^{(1/1,5)} \quad (12)$$

Onde:

S=espaçamento entre as ranhuras (m)

B(m) e H(m) são as dimensões da ranhura

No exemplo do CASO 4, da zona de disfarce de sobrelevação em estudo, a disposição das ranhuras a executar, naquela faixa de rodagem deverá ser do tipo apresentado na figura 19:

Fig.19

A solução de adoptar ranhuras transversais, perpendiculares ao eixo da via, tem o inconveniente do degrau da ranhura “atacar” de frente o pneu o que, provavelmente, poderá causar vibrações incómodas no veículo e acelerar a degradação desse bordo da ranhura.

Estes dois inconvenientes podem ser minimizados com a adopção de ranhuras ligeiramente enviesadas (cerca de 30° em relação à posição transversal) como se sugere na figura 19. Contudo, só com recurso à experimentação, em situações reais, é que se poderá otimizar este tipo de solução. No caso 4 em estudo adoptaram-se ranhuras enviesadas de 30° em relação à direcção transversal da estrada.

O comprimento da ranhura ao longo da faixa de rodagem é:

$$L1 = (\text{largura da faixa de rodagem}) / \cos(30^\circ) = 9\text{m} / \cos(30^\circ) = 10,39\text{m}$$

O cálculo da secção das ranhuras será feito por tentativas, até que o valor (L) da expressão (12) seja, maior ou igual a $L1=10,39\text{m}$. Estes procedimentos pressupõem que, no eixo da estrada, existe uma caleira longitudinal, ao longo da zona de disfarce de sobrelevação .

Assim, por exemplo, adoptando-se ranhuras com as seguintes características ($B=0,038\text{m}$; $H=0,045\text{m}$; $S=1\text{m}$), a segurança contra a ocorrência de hidroplanagem estará garantida, nesta zona compreendida pela linha de água mais extensa, entre o ponto (A) e o ponto (B):

Secção das ranhuras: $B=0,038\text{m}$; $H=0,045\text{m}$

Espaçamento entre as ranhuras a realizar no pavimento $S=1,0\text{m}$

$$L = ((1668874,2 \times B \times H \times (B \times H / (2 \times H + B))^{2/3} \times H^{0,5}) / S)^{(1/1,5)} \\ = ((1668874,2 \times 0,038 \times 0,045 \times (0,038 \times 0,045 / (2 \times 0,045 + 0,038))^{2/3} \times 0,045^{0,5}) / 1,0)^{(1/1,5)}$$

$$L = 10,51\text{m} > L1=10,39\text{m} \text{ verifica a condição exigida}$$

As dimensões referidas para as ranhuras referem-se às dimensões úteis, descontando as espessuras do barramento para impermeabilização referido na figura 18.

Na prática, as ranhuras serão executadas na superfície do pavimento com profundidade constante. A execução de ranhuras com inclinação longitudinal, diferente da inclinação do pavimento, é de execução muito morosa pelo que não foi estudada.

Poderão ser desenvolvidas as relações mais convenientes entre a largura, a profundidade e o espaçamento das ranhuras mas, este tipo de solução é económico, de rápida execução, de fácil inspecção e manutenção.

A eventual limpeza das ranhuras poderá ser feita com jacto de água.

--- CASO 5 ---

Retomando o caso do parecer do LNEC (Proc. 0703/72/17192 de 1 de Setembro de 2008) solicitado pela concessionária da auto-estrada A8, para sua defesa, que faz a apreciação de um Relatório Preliminar apresentado pelo queixoso, vítima de hidroplanagem nesta auto-estrada, verificamos que, essa zona de Disfarce de Sobrelevação, que se pretendia avaliar a sua eventual falta de segurança que possa ter causado a hidroplanagem, tinha as seguintes características previstas a partir dos elementos do projecto:

Comprimento da linha de água, desde a sua origem até à zona em que o veículo do queixoso a interceptou= $L_w=43,12\text{m}$; Inclinação média dessa linha de água é cerca de 0,8788%.

Os valores de macrorugosidade do pavimento dessa zona da auto-estrada A8, apresentados pela concessionária e que constam no parecer do LNEC, referem Altura de Areia variando entre 0,85 e 1,15mm. Neste caso, vamos assumir o melhor cenário para a defesa da concessionária, onde o pavimento nessa zona de Disfarce de Sobrelevação teria Altura de Areia= $A_a=1,15\text{mm}$.

Não havendo dados sobre a chuvada que ocorria naquele local nos instantes do acidente, havendo apenas dados de uma estação meteorológica a alguns quilómetros de distância desse local, vamos considerar, a ocorrência de várias intensidades de chuvadas muito frequentes, para as quais não poderia ocorrer a hidroplanagem para velocidades abaixo de 110km/h. Sabe-se que a temperatura do ar deveria ser da ordem de 14°C.

Pelo Quadro 1 ou pelo gráfico da figura 10, podemos verificar que na ocorrência de chuvadas com intensidade inferior a 40mm/h, a hidroplanagem não poderá ocorrer para velocidades inferiores a 110km/h.

Nesta análise da segurança, indevidamente favorável à concessionária e à autoridade pública que permite estradas nestas condições, ainda vamos considerar os seguintes valores favoráveis: pressão dos pneus de $P=200\text{KN/m}^2$, com ranhuras nos rastros com profundidade de 2mm, superior ao valor mínimo de 1,6mm,.

Os dados resumidos são os seguintes:

$L_w=43,12\text{m}$; $i_w=0,8788\%=0,008788$; $A_a=1,15\text{mm}$, $P=200\text{KN/m}^2$; $TD=2\text{mm}$; $T=14^\circ\text{C}$; Pavimento betuminoso comum (não drenante).

Intensidade da chuva (mm/h)	14 (mm/h)	20 (mm/h)	30 (mm/h)	40 (mm/h)
$h_{\text{Anderson } T=14^\circ\text{C}}$ (mm)	1,874 mm	2,423 mm	3,218 mm	3,887 mm
TC=tempo de concentração (minutos)	16,9 minutos	14,1 minutos	11,5 minutos	9,9 minutos
Velocidade Crítica de Hidroplanagem por Gallaway (1) (km/h)	88,3 km/h	86,5 km/h	84,6 km/h	83,3 km/h
Tipo de chuva nesta região	Chuvada média muito frequente que ocorre mais do que 2,5 vezes por ano	Chuvada forte frequente que ocorre mais do que 2 vezes por ano	Chuvada frequente que ocorre mais do que 1,6 vezes por ano	Chuvada que ocorre 1 vez por ano

Como se observa deste quadro, verifica-se que, mesmo nas condições muito favoráveis em que, agora, se fez a análise, para aquelas chuvas muito frequentes, a hidroplanagem ocorre para velocidades entre 88,3 e 83,3 km/h muito inferiores a 110km/h.

Contudo, se a análise da segurança for realizada com recurso às expressões adequadas (2) e (3), considerando a condição muito favorável de $A_a=1,15\text{mm}$, durante a ocorrência de chuvas médias de 10mm/h, a hidroplanagem surge a partir da velocidade de 89,1km/h muito inferior a 110km/h. Mesmo durante uma chuva fraca de 5mm/h o risco proibido da hidroplanagem instala-se a partir de 108,5km/h.

Em conclusão: aquela zona da estrada viola gravemente as condições de segurança contra a ocorrência de hidroplanagem; é fortemente causal à hidroplanagem até na ocorrência de chuvas com intensidade média e, isto significa que os defeitos do pavimento da auto-estrada A8 colocaram a vida dos seus utentes em condições de perigo concreto.

Os já referidos engenheiros do LNEC (Departamento de Transportes - Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança Rodoviária), conhecendo as características do pavimento daquela zona da auto-estrada, nada referem no seu parecer sobre esses vícios gravíssimos de construção.

6 – O PAVIMENTO DRENANTE

O pavimento drenante, numa primeira análise, parece ser uma boa opção, porque apresenta uma capacidade superficial de infiltração muito superior à intensidade das chuvadas a considerar (o tipo de pavimentos drenantes empregues na Europa têm permeabilidade entre 0,06 a 0,12 litros/segundo (14)-pág.28).

Esses pavimentos, com a porosidade interna em boas condições, possibilitam a circulação interna dos já referidos caudais, provocados pelas chuvadas intensas previstas no Quadro 1, ao longo de distâncias consideráveis, sem que, essas águas pluviais, em escorrência interna, cheguem a surgir à superfície, ao longo do pavimento de rodagem. Quanto isso acontece não há risco de hidroplanagem.

Contudo, ao longo do tempo de serviço do pavimento, a sua porosidade interna vai sendo colmatada pelas sujidades correntes do pavimento. Nos EUA verificou-se que, ao fim do 1º ano de serviço, um terço da permeabilidade interna dos pavimentos drenantes estava perdida (colmatada) (14)-pág.30.

As operações necessárias para manutenção destes pavimentos são caras, com periodicidade de 6 meses, com recurso a aspiração e lavagens com jacto (9)-pág.6.

Os ensaios que servem para avaliar a permeabilidade nestes pavimentos apenas permitem uma avaliação numa área pequena, muito localizada, não havendo o hábito de avaliar a competência do pavimento para drenar, internamente, os caudais consideráveis que resultam das chuvadas prováveis previstas no Quadro 1, nos longos percursos que existem nas zonas de transição da sobrelevação.

Em Portugal, onde não são correntes as boas práticas de conservação, é frequente observar a existência de pavimentos que, no início, eram drenantes e que, ao fim 4 a 5 anos, perdem a permeabilidade pela colmatção da sua porosidade interna, perdendo a segurança obrigatória contra a hidroplanagem.

Outro inconveniente que apresentam os pavimentos drenantes é que oferecem, significativamente, menos aderência do que os pavimentos betuminosos não drenantes, mas com a macrorugosidade elevada, calculada para satisfazer a segurança contra a hidroplanagem. Esta superioridade de aderência quer para velocidades baixas, quer para velocidades altas de deslizamento, pode ser facilmente prevista pelo método do IFI (Internacional Friction Index).

Do que foi referido e pelo facto de não existirem hábitos de aferir a permeabilidade mínima do pavimento para satisfazer os devidos caudais, ao longo dos referidos percursos, de forma a verificar a segurança contra a hidroplanagem, o uso destes pavimentos em Portugal não é aconselhável.

Num país que, politicamente, não está disposto a investir na manutenção, esta deve-se basear em regras simples, rápidas e económicas, o que não é compatível com a manutenção dos

pavimentos drenantes mas que já é compatível com manutenção de camadas de desgaste não drenantes, com a devida macrorugosidade e com a existência de ranhuras transversais, ligeiramente enviesadas (que também são de inspecção rápida).

7 – CONDIÇÕES FAVORÁVEIS EM PORTUGAL PARA A PRÁTICA DE ERROS FREQUENTES CAUSAIS À HIDROPLANAGEM EM CONDIÇÕES PROIBIDAS

7.1 – RODEIRAS E DEFORMAÇÕES NO PAVIMENTO

Depois de abordado o cálculo da velocidade crítica de hidroplanagem, a escolha da chuvada, a verificação da segurança contra a hidroplanagem e os vários exemplos de cálculo, refere-se que, estas considerações, pressupõem a regularidade da superfície do pavimento. Contudo, impõem-se as seguintes observações.

A existência de rodeiras⁷, ou de outras deformações extensas no pavimento, provocam acumulação de lâminas de água com vários milímetros ou centímetros de espessura, o que é fortemente causal à hidroplanagem e consequente perda de controlo da direcção dos veículos para velocidades a partir de 70-77km/h, tal como prevê a expressão (1) de Gallaway, condições essas que são proibidas e, das quais damos alguns exemplos.

Como se pode observar nas fotografias seguintes (fig.20 e 21), esta situação, que existiu durante muitos anos, na auto-estrada A2, na zona do nó de Almada (junto às instalações da “Estradas de Portugal SA”), onde a existência de rodeiras tão profundas que conseguiam canalizar a água, de uma vasta superfície, ao longo de centenas de metros, com vários centímetros de espessura de água, até na ocorrência de chuvadas fracas.



Fig.20

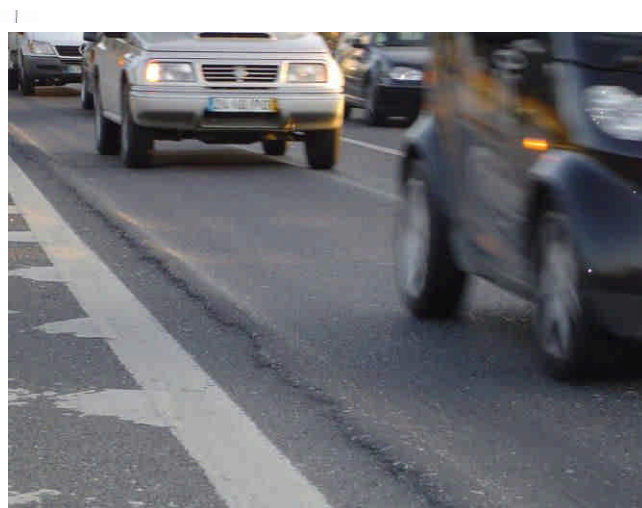


Fig.21

⁷ - deformações que surgem na superfície do pavimento, na zona, frequentemente, pisada pelos rodados dos veículos, formando sulcos longitudinais como se pode observar nas fotografias, em consequência da incorrecta composição do betão betuminoso ou das camadas inferiores do pavimento.

Esta mesma situação proibida é mantida, actualmente, em muitas estradas, ao longo de troços extensos, onde a velocidade de tráfego é elevada, como no IC1 entre Águas de Moura e Alcácer do Sal, desde há vários anos.

As rodeiras exercem o efeito de barragem e de caleira, permitindo a formação de cursos de água com bacias hidrográficas enormes que geram caudais com altura de água sobre o pavimento, na ordem dos centímetros, gerando a hidroplanagem para velocidades superiores a 70km/h, até na ocorrência de chuvadas fracas.

Estas condições são proibidas porque, durante a ocorrência de chuvadas fracas e médias, os condutores ainda dispõem de boas condições de visibilidade e, por isso, são induzidos a manter velocidades, para as quais o engenheiro civil deveria garantir a segurança.

Este plano de avaliação é exclusivo do engenheiro civil, não se podendo transferir essa responsabilidade para as vítimas, os condutores, como tem sido feito em Portugal durante muitos anos, o que tem sido útil para desviar a atenção dos verdadeiros responsáveis.

7.2 – MACRORUGOSIDADES DEFICIENTES

Das muitas centenas de quilómetros que estudámos de auto-estradas e de vias rápidas nacionais, temos verificado que a macrorugosidade (Aa =altura de areia) apresenta sempre valores muito deficientes, tais como por exemplo os seguintes, obtidos em 2007 e medidos em séries de valores, em várias zonas:

A5 - Km=1 – $Aa=0,46mm$

Acesso da A5 para a Av. da Ponte (25 de Abril), em zona de curva – $Aa=0,24mm$!!!

Cril entre Algés e Lisboa – $Aa \leq 0,46mm$ (pavimento betão de cimento)

IC32 – $Aa=0,43mm$

A2 entre o nó de Coina e Almada, com pavimento novo – $Aa=0,71mm$

IP1 (auto-estrada) junto à Ponte Vasco da Gama, junto às bombas da GALP, na margem Sul -- $Aa=0,87mm$

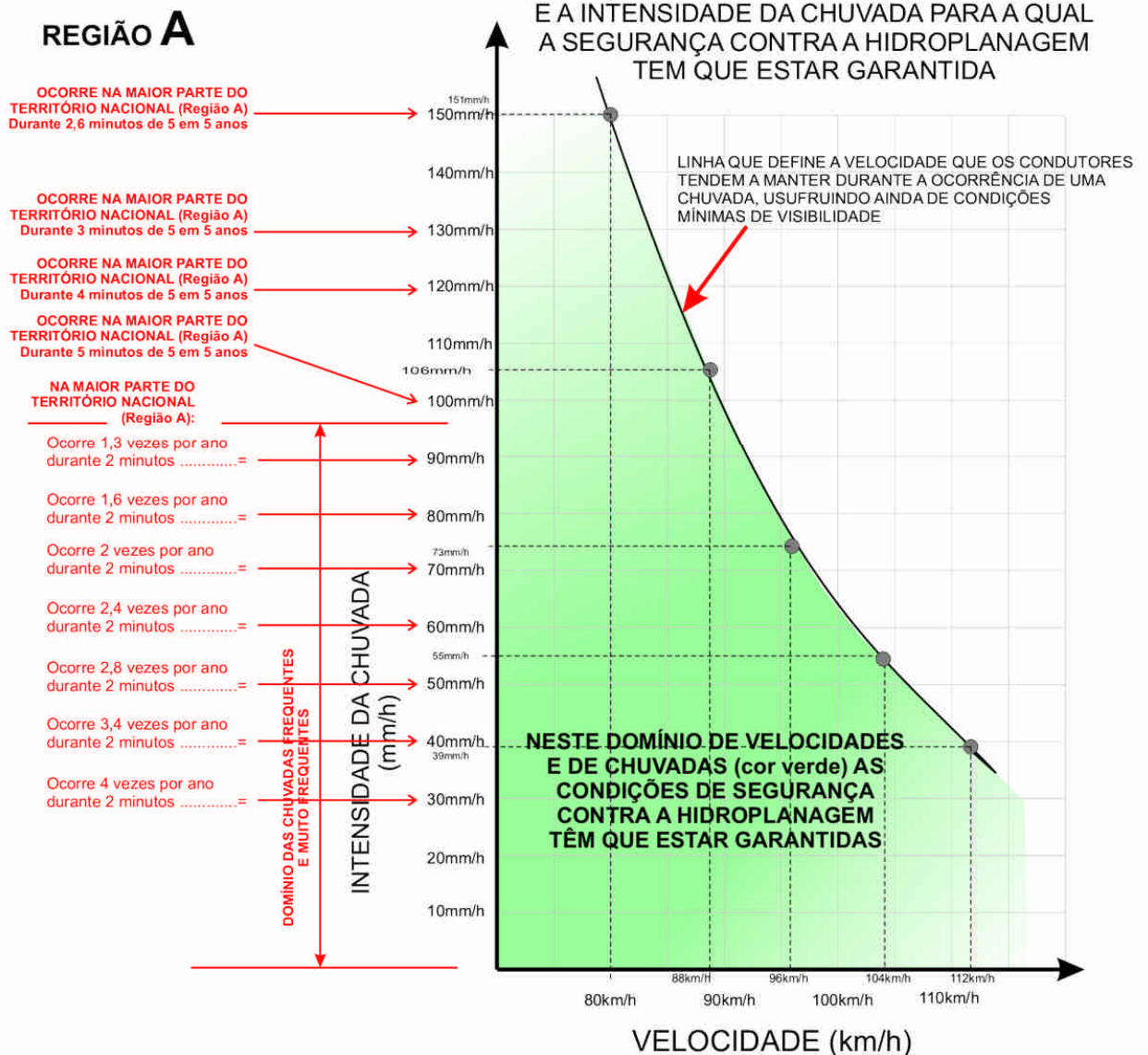
Estes valores de (Aa), na ocorrência de chuvadas muito frequentes e até de chuvadas fracas, provocam hidroplanagem total em condições proibidas nas zonas de disfarce de sobrelevação, conforme se pode confirmar pelos cálculos anteriores.

Para se ter uma noção dos erros grosseiros que são cometidos contra a segurança, na quase totalidade da rede de auto-estradas e vias rápidas, apresentam-se os seguintes gráficos.

O gráfico da Fig.22 exibe o domínio das velocidades e das chuvas para as quais a segurança contra a hidroplanagem deverá estar garantida, tal como já abordámos anteriormente.

Fig.22

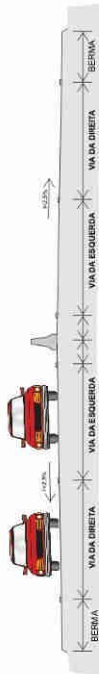
EXEMPLOS DE CHUVADAS CAPAZES DE PROVOCAR O RISCO PROIBIDO DE HIDROPLANAGEM EM EXTENSAS ZONAS DO PAVIMENTO RODOVIÁRIO SE ESTE NÃO TIVER AS CARACTERÍSTICAS ADEQUADAS:



Os dois gráficos seguintes, da Fig.23, apresentam várias curvas onde, cada uma, relaciona a chuva e a correspondente velocidade crítica de hidroplanagem a que se sujeitam os veículos, para um leque de situações que abarca a quase totalidade da rede nacional de auto-estradas e vias rápidas (com duas ou três vias em cada sentido), pavimentadas com betão betuminoso comum, com uma macrorugosidade com Altura de Areia de 0,7mm, que é corrente encontrar nestas estradas e que satisfaz as exigências dos Cadernos de Encargos definidos pelas entidades públicas responsáveis ("Estradas de Portugal, SA").

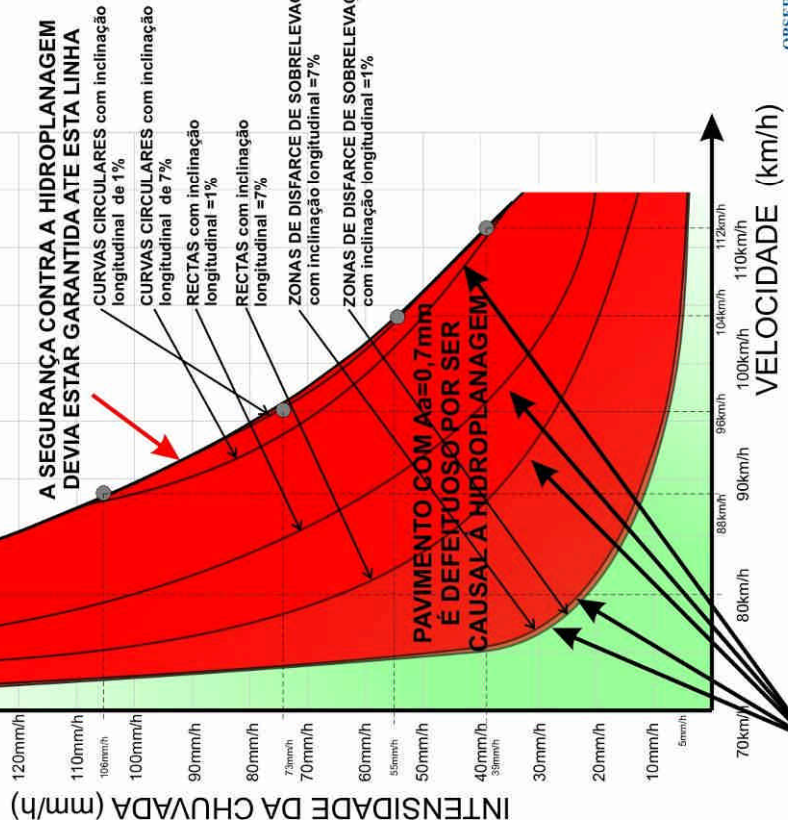
**RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE PRATICADA E A INTENSIDADE DA CHUVADA PARA A QUAL
 O PAVIMENTO RODOVIÁRIO COM MACRORUGOSIDADE COM ALTURA DE AREIA =0,7mm
 É ILICITAMENTE CAUSAL À PRODUÇÃO DE HIDROPLANAGEM**

2 VIAS EM CADA SENTIDO



Pavimento de betão betuminoso, com $Aa=0,7\text{mm}$ em auto-estradas e vias rápidas portuguesas:

- com duas vias em cada sentido;
- com calreira no eixo da estrada na zona de disfarce de sobrelevação e ao longo das curvas circulares. Se esta drenagem não existir no eixo da estrada a situação é ainda mais grave;
- nas curvas circulares considerou-se a sobrelevação $SE=7\%$. Se a sobrelevação for inferior a situação é ainda mais grave.



**A SEGURANÇA CONTRA A HIDROPLANAGEM
SÓ ESTÁ GARANTIDA ATE ESTAS LINHAS**

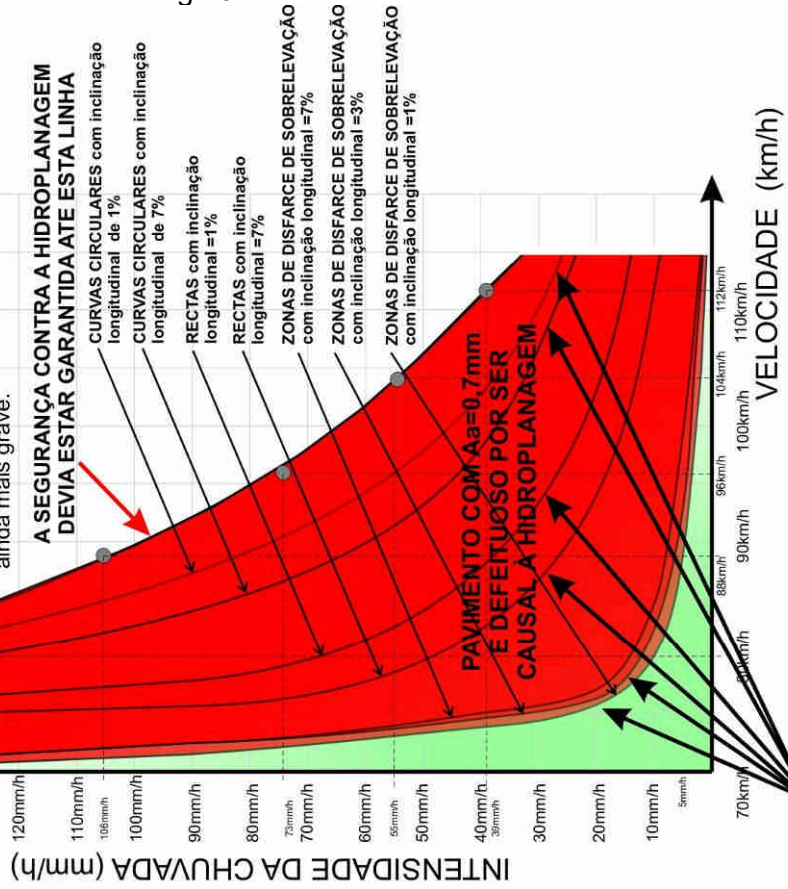
Fig.23

3 VIAS EM CADA SENTIDO



Pavimento de betão betuminoso, com $Aa=0,7\text{mm}$ em auto-estradas e vias rápidas portuguesas:

- com três vias em cada sentido;
- com calreira no eixo da estrada na zona de disfarce de sobrelevação e ao longo das curvas circulares. Se esta drenagem não existir no eixo da estrada a situação é ainda mais grave;
- nas curvas circulares considerou-se a sobrelevação $SE=7\%$. Se a sobrelevação for inferior a situação é ainda mais grave.



**A SEGURANÇA CONTRA A HIDROPLANAGEM
SÓ ESTÁ GARANTIDA ATE ESTAS LINHAS**

Nestes gráficos podemos verificar que, nas zonas de disfarce de sobrelevação, basta a ocorrência de chuvadas médias e fracas, para se formarem lençóis de água em escorrência, provocando a hidroplanagem para velocidades cerca de 80-88km/h.

Os erros são tão graves que, mesmo que a Altura de Areia desses pavimentos seja de 0,8 ou de 1,1mm, as situações mais perigosas ainda persistem com extrema gravidade.

Como se verifica, na quase totalidade da rede nacional de auto-estradas e vias rápidas, a deficiência dos pavimentos existentes é enorme e completamente inaceitável por colocar em perigo a vida dos seus utentes até durante a ocorrência de chuvadas de fraca e média intensidade.

Nos últimos anos tem-se realizado o alargamento das plataformas de alguns troços de auto-estrada (tal como na A2 e na A1), passando de duas vias para três vias em cada sentido. Este tipo de intervenção corresponde a um aumento significativo do comprimento das linhas de água sobre o pavimento rodoviário, agravando ainda mais o perigo de hidroplanagem a que se sujeitam os utentes dessas vias, em virtude de não ter havido qualquer cuidado de aumentar a capacidade drenante superficial do pavimento para os níveis mínimos necessários. Entre os dois gráficos da Fig.23 podemos apreciar o aumento desse perigo onde a hidroplanagem passa a ocorrer para chuvadas ainda mais fracas.

Mesmo um juiz de direito, que desconheça em absoluto os critérios técnicos de segurança que uma estrada deve garantir, percebe, no seu senso comum, que sendo a velocidade máxima permitida de 120km/h e que o condutor tem o dever de reduzir a velocidade durante a ocorrência de uma chuvada, e, se esse condutor reduzir para 100km/h, já terá cumprido o seu dever de cuidado, ainda para mais porque, sob uma chuvada média, por exemplo, de 12mm/h e se não circularem outros veículos próximos, o condutor, a 100km/h, disporá de boas condições de visibilidade sobre a estrada.

Contudo, com aquela chuvada (12mm/h), a vida dos utentes da estrada é colocada em perigo concreto, porque a hidroplanagem ocorre para velocidades superiores a 79-85km/h, por defeito grave da capacidade de drenagem superficial do pavimento da estrada.

Ao condutor, a circular na auto-estrada, nunca se poderá exigir que consiga avaliar que, durante chuvadas, a que correspondem condições aceitáveis de visibilidade sobre a estrada, mesmo que reduza a velocidade para 100km/h ou até para 90km/h, que ainda estará sujeito à hidroplanagem que surge a partir de velocidades de 73 a 80km/h. Esse campo de avaliação está a montante do campo de avaliação do condutor e pertence ao engenheiro civil sendo sua a obrigação de avaliar o cumprimento das condições técnicas de segurança.

7.3 – O ENSINO UNIVERSITÁRIO, O LNEC E A ORDEM DOS ENGENHEIROS

Em 17-Abril-2008 foi publicado um artigo no jornal “PÚBLICO” intitulado “SEGURANÇA RODOVIÁRIA - ESTRADAS PORTUGUESAS TÊM RISCO ELEVADO DE "AQUAPLANING", da autoria da jornalista Sofia Rodrigues, do qual transcrevemos a parte final:

“As conclusões do Observatório que apontam para risco elevado de "aquaplaning" nas estradas portuguesas não merecem comentários por parte do chefe do núcleo de planeamento de tráfego e segurança do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), João Cardoso, por desconhecer se os conceitos estão a ser bem aplicados pela organização não governamental. Em termos gerais, João Cardoso acredita que as estradas portuguesas cumprem os requisitos de segurança exigidos quanto ao “aquaplaning”: *"Suponho que essas verificações são feitas. De resto, o problema tem que ser visto caso a caso."*

Instado também pelo PÚBLICO a pronunciar-se sobre a segurança das estradas portuguesas relativamente ao risco de “aquaplaning”, o bastonário da Ordem dos Engenheiros, Fernando Santo, sublinha que *"seria ridículo um decreto-lei a impor regras na construção de estradas, há sim boas práticas e devem continuar"*. As infra-estruturas rodoviárias resultam de *"vários equilíbrios, entre os quais o traçado, a adaptação ao terreno e os custos"*. Fernando Santo põe a tónica no comportamento do condutor, que deve adequar-se às condições da estrada, do tempo e do tipo de viatura. De outra forma, conclui, *"estamos a passar um atestado de estupidez aos condutores"*.

Francisco Salpico alega que o problema do “aquaplaning” é subestimado até na formação de técnicos como os auditores de segurança rodoviária. Henrique Machado, do Centro Rodoviário Português, promotor dos cursos de auditorias de segurança rodoviária (que inspecionam as estradas em projecto), confirma que o tema só merece cerca de 20 minutos numa aula. Lembra que o piso drenante é mais dispendioso e que perante chuvas como as que ocorreram a 18 de Fevereiro deste ano *"qualquer condutor deve abrandar"*. Quanto às conclusões do OSEC sobre “aquaplaning”, Henrique Machado não poupa críticas: *"O Observatório (...) faz juízos de valor sem base técnica"*.

Uma das principais condições, que existe em Portugal, que explica a falência gravíssima por hidroplanagem, dos pavimentos das estradas portuguesas, reside no desconhecimento geral desta matéria por parte dos engenheiros civis com responsabilidade na aprovação dos projectos de estradas e na manutenção dessas obras da Engenharia Civil, na especialidade de Transportes.

Esta constatação deriva do facto de, no ensino universitário da Engenharia Civil e nos cursos de Auditoria de Segurança Rodoviária, não se ensinar a formulação de cálculo da Velocidade Crítica de Hidroplanagem (que está assente desde 1979, com os trabalhos de Gallaway)⁸ e, muito menos, a matéria complementar que se resumiu neste artigo (que foi desenvolvida até 1998).

Nas publicações do LNEC, as poucas referências que se fazem sobre esta matéria da hidroplanagem são da maior insuficiência por assumirem conclusões genéricas, muito incompletas e nunca promovendo um nível de conhecimento mínimo.

⁸ - Com excepção das disciplinas sob responsabilidade do Prof. Adalberto França da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto onde se ensina o cálculo da Velocidade Crítica de Hidroplanagem.

Por sua vez, o Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança Rodoviária, integrado no Departamento de Transportes do LNEC, emite pareceres sobre a segurança de zonas de estradas que são fortemente causais à hidroplanagem, em níveis proibidos, e, nesses pareceres, esta realidade não é referida.

No LNEC, o Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias, integrado no Departamento de Transportes, também emite pareceres sobre pavimentos rodoviários e, esta grave deficiência dos pavimentos não é referida nem considerada.

Neste ambiente, universitário/investigação/profissional, ainda se continua a ensinar que os critérios técnicos de segurança (estabelecidos, no seu essencial, na Norma de Traçado) que uma estrada deve cumprir, são facultativos (!!!) tais como: a Velocidade Específica da curva dever ser superior à Velocidade de Tráfego; garantir as Distâncias de Visibilidades Mínimas; garantir que o traçado não induz variações perigosas na Velocidade de Tráfego; etc; quando, à luz do Direito, esses critérios são de cumprimento obrigatório por constituírem regras de segurança determinadas pelas *legis artis edificandi* essenciais à preservação da vida humana.

Em resultado, verifica-se que, na aprovação dos projectos de construção de estradas novas ou de intervenção em estradas existentes, é corrente a prática ilícita dos critérios económicos prevalecerem sobre os critérios de segurança criando, em consequência e à partida, as futuras zonas de acumulação de acidentes por violações gravíssimas de vários critérios técnicos de segurança.

O OSEC prosseguirá com a sua missão de promoção da segurança rodoviária, elaborando estudos, ao mesmo tempo denunciará as falsas campanhas nominadas de segurança rodoviária, mas que, na sua essência, não consideram um único tema da engenharia de transportes cujas regras são determinantes para a construção e manutenção de estradas seguras.

Por: Eng^o Francisco José C.R. Pires Salpico

Portugal, 7/Novembro/2009

Licenciado em Engenharia Civil (Estruturas) em 1987, pelo Instituto Superior Técnico, veio a concluir o Mestrado em Engenharia de Estruturas em 1991, também no Instituto Superior Técnico, cuja a tese de dissertação incide sobre o tema 'Interação Dinâmica Veículos/Pontes'.

Tem exercido a profissão quer na execução de projecto de pontes e edifícios, quer no acompanhamento das referidas obras.

Foi um dos fundadores do Observatório de Segurança de Estradas e Cidades, pertencendo ao seu conselho executivo, que se encontra activo desde 22 de Novembro de 2004.

O Observatório de Segurança de Estradas e Cidades (OSEC), com sede no Tribunal da Relação de Lisboa, é uma organização não governamental, totalmente independente do Estado, sem sujeições políticas ou partidárias, sem dependências financeiras (já que não solicita nem aceita subsídios de ninguém), apenas tendo em vista a prossecução de fins humanitários e altruísticos, na medida em que pretende, desinteressadamente, além do mais, contribuir para a redução da sinistralidade rodoviária, com independência e objectividade.

O Observatório tem como seus membros engenheiros civis, magistrados, advogados, professores universitários, outros representantes de várias entidades convidadas e diversos colaboradores, que visam prosseguir os fins atrás referidos.

Notas de agradecimento: Este trabalho contou com: sugestões da Dr^a Paula Candelário (responsável pelo extinto Laboratório da C.M.Lisboa que ainda procedia à verificação das características dos pavimentos rodoviários); a colaboração de um Engenheiro Civil que, disponibilizando referências bibliográficas determinantes, prefere o anonimato: e com o apoio da esposa e das filhas.

(o autor está à disposição, para esclarecimentos, pelos contactos:

e-mail= francisco.salpico@gmail.com telemóvel= 914005433

Este apoio é especialmente dirigido aos engenheiros envolvidos na resolução dos referidos problemas graves)

8 - BIBLIOGRAFIA:

- (1) – “Relationship between Surface Characteristics and Accidents”. Proc. 3rd International Symposium on Pavement Surface Characteristics, pp. 271-281, 1996. Gothie, M.
- (2) – “Análise Histórica de Medição de Atrito das Pistas do Aeroporto Santos Dumont – RJ”, INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA, CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL, Divisão de Infra-Estrutura Aero náutica, tese de graduação, Edimar de Lima dos Santos, 2004, Brasil. (http://www.civil.ita.br/graduacao/tgs/resumos/2004/TGIEI010_2004a_Edimar.pdf)
- (3) – “CLASSIFICAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO PELO ÍNDICE COMBINADO IFI-INTERNATIONAL FRITON INDEX, PARA REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS”, Márcia APS, tese de doutoramento na Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, 2006
(<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-11122006-144825/>)
- (4) – “Grooving: Aspectos Teóricos e Executivos da Aplicação em Pavimentos Aeroportuários”, Silva, A. M.; Rodrigues Filho, O. S., COPASP, S. Paulo, 1981
- (5) – “Atrito em Pistas Molhadas”, Silva, A. M., Revista da Directoria de Engenharia da Aeronáutica, Rio de Janeiro, 1981.
- (6) – “Friton Fundamentals, Concepts and Methodology”, A. Andresen, J. C. Wambold, Transportation Development Centre Transport Canada, October 1999
(<http://www.tc.gc.ca/TDC/publication/pdf/13800/13837e.pdf>)
- (7) - “*Potential for Hydroplaning on High Speed Roads*”, Donald, G. et al, International Symposium on Pavement Surface Characteristics, ARRB Transport Research LTD, Victoria, Austrália, 1996
- (8) – Relatório do Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança / Departamento de Transportes / LNEC, Proc. 0703/72/17192, 1 de Setembro de 2008
- (9) – “The Use of the Gallaway Formula for Aquaplaning Evaluation in New Zealand”, por John Chesterton, Noel Nancekivell, Noel Tunnicliffe, The Northern Gateway Alliance, Transportation and the Pursuit of Excellence, NZIHT & Transit NZ 8th Annual Conference 2006 (http://www.transit.govt.nz/content_files/conference/J-Chesterton.pdf)
- (10) – Articulado, com 28 páginas, apresentado no Tribunal Administrativo de Círculo de Lisboa (1º Juízo Liquidatário), na defesa da “Estradas de Portugal, SA”, no Processo nº 4/2005.
- (11) – “A COMODIDADE E A SEGURANÇA COMO CRITÉRIOS CONDICIONANTES DA GEOMETRIA DO TRAÇADO - O CASO DAS CLOTÓIDES DE TRANSIÇÃO”, Engº Adalberto Quelhas da Silva França, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1988

(12) - "Prediction of Hydroplaning Potential from Runoff Characteristics of Highway Pavements", Reed, J. R., Kibler, D. F., Huebner, R. S., and Marks, G.W., FHWA/RD-84/004, The Pennsylvania Transportation Institute, 1985;

(13) – "Criteria For Predicting Hydroplaning Potencial", Huebner, R.S. et al, Journal of Transportation Engineering, vol.112 nº5, Set, 1985, P.549-553

(14) - "Improved Surface Drainage of Pavements-Final Report". NCHRP, 1998. Anderson, D.A., Huebner, R.S., Reed, J.R., Warner, J.C., and Henry J.J.

(15) - "Manual dos Sistemas Prediais de Distribuição e Drenagem de Águas", Vítor M. R. Pedroso, LNEC;

(16) – "Wet Runway Friction: Literature and Information Review", Prepared by: G. Comfort ,Prepared for Transportation Development Centre, On behalf of Aerodrome Safety Branch Transport Canada, August 2001

(17) – "Lições de Hidrologia", Lencastre, A.; Franco, F.M., Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Cap.3

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

(19) - "Rainfall and Visibility-The View From Behind the Wheel", Ivey D.L., Lehitipuu, E. K. and Button, J. W., Research Report 135-3, Texas Transport Institute, Colege Station, Tex. Feb, 1975

(20) – "HYDROPLANING, HYDRODYNAMIC DRAG, AND VEHICLE STABILITY", ASTM Special Technical Publication nº 793, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1983)

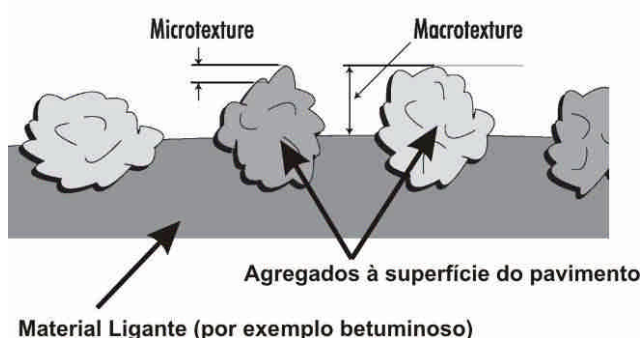
(21) – "Proposed design Guidelines for Reducing Hydroplaning on New and Rehabilitated Pavements", Research Results Digest, September 1999 nº243, National Cooperative Highways Research Program

ANEXO 1

A MACRORUGOSIDADE DO PAVIMENTO E O ENSAIO DA MANCHA DE AREIA

As condições de aderência do pavimento de rodagem são determinantes em relação à segurança e dependem da microrugosidade (microtextura) e da macrorugosidade (macrotextura) do pavimento, conforme se ilustra na seguinte imagem.

Superfície Ampliada do Pavimento da Estrada



Da avaliação destas duas características calculam-se as condições de aderência do pavimento de rodagem, para qualquer velocidade (pelo método do IFI) e que se revelam críticas com o piso molhado. A MICRORUGOSIDADE é avaliada pelos tribômetros, com piso molhado, pela medição do coeficiente de atrito para baixas velocidades de deslizamento.

A MACRORUGOSIDADE é avaliada pela ALTURA DE AREIA (A_a ⁽⁹⁾) que resulta do Ensaio da Mancha de Areia. O nível de segurança garantido pelo pavimento de rodagem, para velocidades elevadas, é condicionado pela MACRORUGOSIDADE. Regra geral, a Altura de Areia adequada para um pavimento resulta condicionada pela verificação da segurança contra a ocorrência de hidroplanagem.

Método da Mancha-de-Areia

“Um dos métodos mais utilizados para a medição da macro-textura é o Método da Mancha de Areia, que consiste em colocar sobre a superfície do pavimento um volume pré-determinado de areia fina e espalhá-la circularmente utilizando-se um disco especial. Então, com a medida da área da mancha de areia sobre o pavimento e o volume de areia utilizado, calcula-se uma profundidade média dos vazios preenchidos por areia, valor utilizado como medida de macro-textura superficial.”

“De acordo com a norma IAC 4302, o equipamento utilizado consiste em um cilindro metálico com volume interno de 24cm³ e um espalhador tipo carimbo manual. A areia a ser utilizada deve possuir granulometria contida entre as peneiras #50 e #100, isto é, passando na #50 e sendo retida pela #100.”

“Um dos problemas da utilização do Método da Mancha de Areia em revestimentos asfálticos drenantes está na penetração excessiva dos grãos de areia nos poros vazios, o que leva à redução da área da mancha de areia e à maximização da medida de macro-textura. Na figura abaixo, apresenta-se um esquema simplificado do Método da Mancha de Areia.” (2)- Edimar de Lima dos Santos, 2004, pág.31.

⁹ - No meio técnico a Altura de Areia (A_a) também é designada, na literatura estrangeira, por MTD, em milímetros.

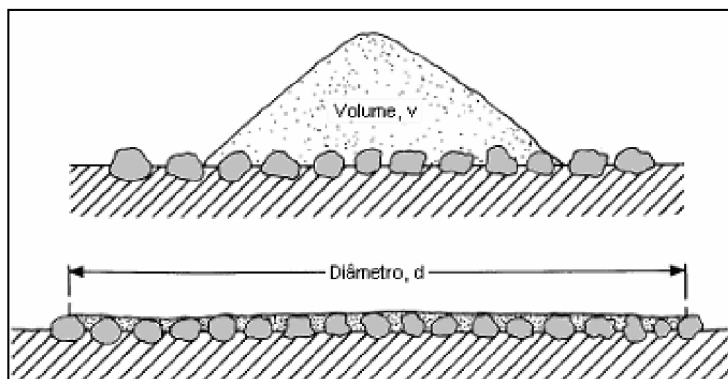


Figura 4.7 – Método da Mancha-de-Areia

Recomenda-se a leitura da especificação espanhola sobre a realização deste ensaio onde, além de outras recomendações úteis, indica a utilização de areias mais finas que tornam possível a medição de Alturas de Areia muito reduzidas.

Com o diâmetro médio da mancha de areia D (cm) calculamos a Altura de Areia (mm), sendo $V(\text{cm}^3)$ o volume de areia usado no ensaio:

$$Aa = V / (3,1415927 \times (D/2)^2) \times 10$$

Ensaio da Mancha de Areia num pavimento corrente em Portugal, nas estradas municipais onde não se realiza qualquer controlo desta característica do pavimento.

Volume de areia=24,6cm³ Diâmetro médio=36,2cm e
 $Aa=0,24\text{mm}$ $V85=97\text{Km/h}$

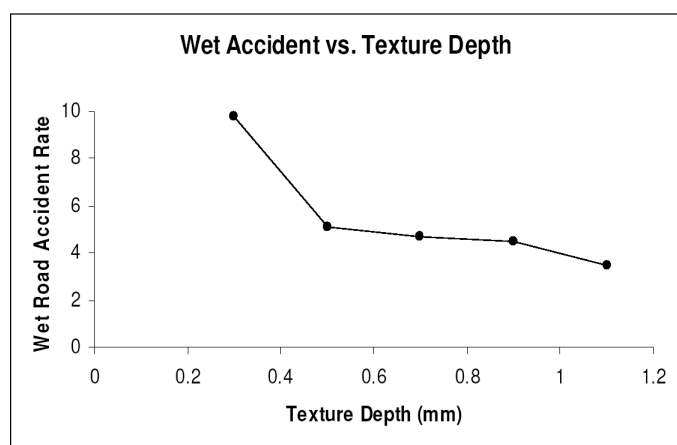
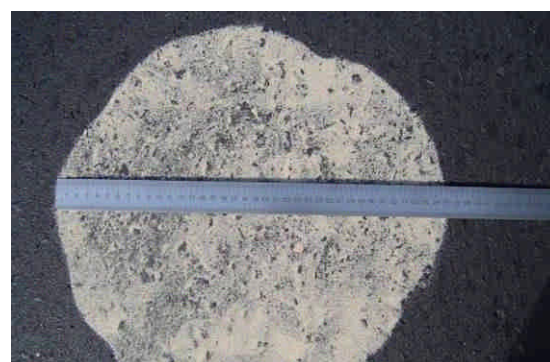


FIGURE 17 Relationship Between Wet-Accident and Surface Texture Depth.

Na Figura 17 verificamos o forte crescimento da taxa de acidentes com piso molhado quando a macrorugosidade (texture depth) é inferior a 0,5mm

(1)-Gothie, M., 1996.

Artigo concluído em 13/Outubro/2009, publicado na revista nº5 "TECNOLOGIA E VIDA" da ANET-Norte (Outubro/2009) com versão melhorada disponível no site <http://www.cril-segura.com/>. Em 7/Novembro/2009 corrigiu-se:

- o cálculo das intensidades das chuvas, com período de retorno inferior a 2 anos, fazendo recurso a regressões polinomiais do 2º;
- o facto excepcional do cálculo da Velocidade Crítica de Hidroplanagem ser ensinado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.