

A DRENAGEM SUPERFICIAL E O SEU IMPACTO FUNCIONAL E ESTRUTURAL NA VIDA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

VANESSA DIAS LOPES FERNANDES FRANCISCO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Adalberto Quelhas da Silva França

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha mãe,

*que colocou os estudos como prioridade na minha vida
e que sempre acreditou no meu sucesso.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível com o apoio e ajuda de várias pessoas, às quais eu gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos, em particular:

A Deus, porque sem ele nada seria possível.

Ao meu orientador e Padrinho de Curso, Prof. Doutor Adalberto França, pelos conselhos e orientações que me deu ao longo da realização desta dissertação e por todo o incentivo e disponibilidade demonstrados.

Aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos e por proporcionarem todas as condições para que se pudesse concretizar este trabalho, em especial à minha mãe pelo seu amor e encorajamento principalmente nestes últimos meses em que teve de abdicar da minha companhia. Ao meu pai obrigada por queres o melhor para mim.

À minha irmã Susana, que sempre foi para mim um “modelo” a seguir. Obrigada por me apoiares ao longo da vida e por me fazeres acreditar que ela pode ser melhor se lutarmos pelos nossos objectivos.

À minha irmã gémea Liliana, que é a minha vida! A ti mana, devo-te tudo! Estiveste sempre ao meu lado, nestes anos de alegrias e tristezas. Obrigada por todas as palavras de incentivo durante esta fase mais complicada. Embora a distância nos separe estás sempre no meu coração.

Ao meu namorado Jaime, que ao longo destes 4 anos e meio esteve incansavelmente a meu lado, preenchendo a minha vida com alegrias, sonhos e esperança. Obrigada pelo teu amor, dedicação e ajuda inestimável nesta etapa.

Ao meu cunhado Carlos, pelas conversas de incentivo ao fim-de-semana, pelo senso crítico demonstrado e ajuda nesta recta final.

Ao meu sobrinho Vasco, que apesar dos seus 4 anos enche o meu coração de orgulho. Foram as suas frases ingénuas que me fizeram sorrir nos momentos mais cansativos.

Às minhas amigas e colegas de curso, em especial a Carla e a Juliana, que tornaram este último ano inesquecível. Obrigada pela amizade, disponibilidade e preciosa ajuda nos momentos decisivos.

RESUMO

Os pavimentos rodoviários são infra-estruturas que apresentam uma evolução degradativa do estado funcional e estrutural para o qual foram projectados. Ao longo da sua vida útil devem garantir um nível de qualidade que assegure condições de segurança, de conforto, de economia e de qualidade ambiental.

Muitas patologias que ocorrem nos pavimentos rodoviários têm origem numa drenagem superficial ou sub-superficial deficiente. A principal consequência destas patologias relaciona-se com a duração da vida útil destes pavimentos, que será inferior àquela que seria previsível no caso de ter sido acautelada a situação deficiente de drenagem.

Desde a implantação das primeiras obras existem indicações de que os seus construtores já apresentavam conhecimentos acerca da influência da drenagem no desempenho dos pavimentos. Muitos países, onde os custos rodoviários são avaliados criteriosamente ao longo de toda a vida de serviço do pavimento, têm desenvolvido pesquisas pretendendo uma consideração quantitativa dos efeitos prejudiciais da água em excesso no interior de sua estrutura.

Métodos consagrados como, por exemplo, o da AASHTO, já consideram a influência da eficiência do sistema de drenagem no dimensionamento das estruturas de pavimentos.

A presente dissertação abordará principalmente as consequências negativas, sob o ponto de vista funcional e estrutural, de uma drenagem superficial deficiente.

Relativamente ao aspecto funcional, existe uma preocupação geral quanto à aderência que se pode obter entre os pneus e o pavimento, principalmente em estradas onde a velocidade seja mais alta, tornando a aderência um factor muito importante para a segurança da circulação. O atrito nas pistas muda ao longo do tempo, em função do tráfego, das condições climáticas e das práticas de manutenção adoptadas. Contaminantes como as águas superficiais causam diminuição do atrito das superfícies dos pavimentos. A ligação pneu-pavimento é o factor de maior interesse para a segurança dos veículos quanto à aquaplanagem em condições de pista molhada. A aderência é função da textura do pavimento, a qual é dividida em macro e microtextura. A principal forma de medição da macrotextura é por meio do ensaio de Mancha de Areia. A microtextura é geralmente obtida com o ensaio de Pêndulo Britânico. Neste sentido, serão abordados tópicos importantes e necessários para melhor compreensão dos fenómenos que envolvem este tema, apresentando conceitos relativos à hidroplanagem.

Ainda relativamente à influência das águas nos pavimentos, serão apresentadas medidas de combate para se evitar a perda de contacto entre pneu e pavimento, tais como, o uso de pavimentos drenantes e as transições de sobrelevações com disfarce parabólico de 3º grau.

Quanto ao aspecto estrutural, esta dissertação salientará as principais patologias dos pavimentos. Neste capítulo serão apresentadas as degradações que têm como origem as águas superficiais sob os pavimentos e também as degradações que as águas, ainda que indirectamente, causam a rotura prematura do pavimento.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos rodoviários, Hidroplanagem, Pavimentos drenantes, Sobrelevações, Patologias dos pavimentos

ABSTRACT

Road pavements are infrastructures which suffer, as time goes by, a decrease of their functional and structural performances. During their life span, they should insure a specific level of safety, comfort, economy and environmental impact.

Some pathologies affecting road pavements are originated by insufficient superficial and sub superficial drainage. The main consequence of this phenomenon is negatively correlated with life span of these infrastructures which could become inferior to what would be desirable.

Historical data demonstrates that ancient engineers and constructors were already aware of efficient drainage impact on pavements preservation. Many modern countries have tried to quantify repair costs due to water excess and insufficient drainage. Moreover, some popular methods, e.g. AASHTO, have already integrated the efficiency level of the drainage system on road pavements design and calculation.

The present study will try to assess the negative consequences on the road pavement functional and structural performances due to insufficient superficial drainage.

From the functional point of view and taking into account that it is a very important factor for safety, especially for motorways where high speeds are reached, there is a big concern about the adherence between the tires and the pavement. Adherence decreases with time, accordingly with traffic and weather conditions and also with adopted maintenance measures. Besides, chemical contaminants left on the pavements also contribute to adherence decreasing which is also a key factor for safety with wet conditions and aquaplaning phenomenon.

Adherence level also results of pavement texture and it is split into *macro* and *micro* texture. Macro texture is measured through the “Mancha de Areia” test. Micro texture is generally obtained with the British Pendulum test. To this extent, other subjects will be discussed for a better understanding of this field of knowledge. Aquaplaning will also be investigated. Measures to prevent loss of adherence between tires and pavement, e.g. draining pavements and super elevated transitions with 3rd level parabolic disguises, will be presented.

From the structural point of view, this research will explore the possible pathologies affecting pavements. In this section, it will also be presented the premature damages caused by superficial waters.

KEY WORDS: Road pavements, Aquaplaning, Draining pavements, Super elevations, Pavement pathologies

RÉSUMÉ

Les chaussées routières, faisant partie des voies de communication, souffrent une perte progressive de ses performances structurelles et fonctionnelles. Pendant leur durée de vie, elles doivent garantir un niveau minimum de sécurité, de confort, d'économie et d'impact sur l'environnement.

Les pathologies qui affectent les chaussées sont causées par le drainage superficiel et sous-superficiel insuffisant. À cause de cela, la durée de vie des chaussées devient, donc, inférieur au niveau souhaité.

L'histoire démontre que les ingénieurs et constructeurs du passé étaient déjà au courant de ces effets négatifs et de la relation entre la durée de vie des chaussées et le drainage efficient. Plusieurs pays modernes ont essayé de quantifier les coûts de réparation due à l'excès d'eau et au drainage insuffisant. Par ailleurs, quelques méthodes de calcul populaires, comme par exemple l'AASHTO, ont déjà intégré le niveau d'efficience du système de drainage d'eau pour le dimensionnement des chaussées des voies de communication.

Cet' étude explorera les conséquences négatives sur les performances fonctionnelles et structurelles des chaussées liées à un drainage superficiel insuffisant.

Concernant l'aspect fonctionnel et prenant en compte l'importance de la sécurité, spécialement sur les autoroutes ou des vitesses élevées sont atteintes, il y a une grande préoccupation concernant l'adhérence entre les pneus et les chaussées. L'adhérence diminue avec le temps, en fonction du niveau de circulation, les conditions météorologiques et de la maintenance. Des contaminants peuvent être jetés sur les chaussées et, en conséquence, l'adhérence est pénalisée. Celle-ci devient encore plus importante sous des conditions de route mouillée ou le phénomène d'aquaplaning peut arriver facilement.

Le niveau d'adhérence est influencé aussi par la texture de la chaussée. La texture peut être considérée comme *macro* et *micro* texture. La macro texture peut être mesurée par le test « Tâche de Sable ». La micro texture peut être mesurée par le test du Pendule Britannique. D'autres sujets seront abordés afin de mieux comprendre cette problématique. Hydroplanage sera aussi analysé. Des mesures seront proposées afin de réduire la perte d'adhérence entre les pneus et les chaussées comme, par exemple, les chaussées drainantes et les transitions sus-élevées avec des déguises paraboliques de 3eme degré.

Du point de vue structurelle, cet' étude abordera les pathologies qui affectent les chaussées. Ce projet analysera aussi les dommages prématurés causés par les eaux superficielles.

TERMES CLÉS: Chaussées routières, Hydroplanage, Chaussées drainantes, Sus-élévations, Pathologies des chaussées.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
RÉSUMÉ	vii

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. JUSTIFICATIVA DO TEMA E A SUA IMPORTÂNCIA	2
1.3. OBJECTIVOS	2
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3

2. IMPACTOS FUNCIONAIS

2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. PERDA DE ADERÊNCIA EM PISTAS MOLHADAS	5
2.2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2.2. REDUÇÃO DOS COEFICIENTES DE ADERÊNCIA	7
2.3. AUMENTO DO RISCO DE HIDROPLANAGEM.....	11
2.3.1. INTRODUÇÃO	11
2.3.2. TIPOS DE HIDROPLANAGEM.....	11
2.3.2.1. Hidroplanagem Viscosa	11
2.3.2.2. Hidroplanagem Dinâmica.....	12
2.3.2.3. Hidroplanagem por Desvulcanização	13
2.3.2.4. Hidroplanagem Combinada – Modelo das 3 Zonas e 4 Fases.....	14
2.3.3. FACTORES DE QUE DEPENDE A AQUAPLANAGEM	17
2.3.3.1. Espessura da lâmina de água.....	17
2.3.3.2. O pneumático	20
2.3.3.3. A velocidade	24
2.3.3.4. A rugosidade da camada de desgaste do pavimento	33
2.3.4. EFEITOS DOS TIPOS DE TEXTURA	34
2.3.5. MICROTATURA, MACROTATURA E SUA INFLUÊNCIA	36
2.3.5.1. Generalidades	36
2.3.5.2. Superfícies com Macrotatura Fechada e Microtatura lisa	38

2.3.5.3. Superfícies com Macrotextura Fechada e Microtextura Áspera	40
2.3.5.4. Superfícies com Macrotextura Aberta e Microtextura Lisa	41
2.3.5.5. Superfícies com Macrotextura Aberta e Microtextura Áspera.....	42
2.3.5.6. Avaliação da Microtextura e Macrotextura	43

3. IMPACTOS ESTRUTURAIS

3.1. INTRODUÇÃO

3.2. PATOLOGIAS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

3.2.1. FAMÍLIAS E TIPOS DE DEGRADAÇÕES DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....

3.2.2. DEFORMAÇÕES.....

3.2.3. FENDILHAMENTO.....

3.2.4. DESAGREGAÇÃO DA CAMADA DE DESGASTE

3.2.5. MOVIMENTO DE MATERIAIS

3.2.6. REPARAÇÕES

3.3. PATOLOGIAS DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

3.3.1. FAMÍLIAS E TIPOS DE DEGRADAÇÕES DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

3.3.2. MOVIMENTO DOS MATERIAIS

3.3.3. DEFORMAÇÕES.....

3.3.4. FENDILHAMENTO DAS LAJES

3.3.5. DEFEITOS DE SUPERFÍCIE

3.4. PATOLOGIAS DOS PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS

3.4.1. FAMÍLIAS E TIPOS DE DEGRADAÇÕES DOS PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS.....

3.4.2. FENDILHAMENTO POR FADIGA

3.4.3. FENDILHAMENTO POR RETRACÇÃO.....

3.4.4. DEGRADAÇÃO COM PERDA DE COESÃO.....

3.4.5. DEGRADAÇÃO DA INTERFACE.....

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE AS PATOLOGIAS

4.COMBATE AOS EFEITOS DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS.....

4.1. PAVIMENTOS DRENANTES

4.1.1. VANTAGENS.....

4.1.1.1. Evacuação da água através dos seus poros com uma drenagem vertical e posteriormente fracamente inclinada.....

4.1.1.2. Redução do nível de ruído provocado pelo tráfego	74
4.1.1.3. Aumento dos coeficientes de aderência para velocidades elevadas	74
4.1.2. DESVANTAGENS	74
4.1.2.1. Perda de porosidade	75
4.1.2.2. Menor durabilidade.....	77
4.1.2.3. Menor resistência mecânica do pavimento	77
4.2. TRANSIÇÃO DA SOBREELEVAÇÃO EM ESTRADAS DE DUAS VIAS	77
4.2.1. ANTECEDENTES.....	77
4.2.2. ELEMENTOS BÁSICOS NO MODELO DE DISFARCE EM ESTRADAS DE DUAS VIAS	77
4.2.3. ZONA DE VARIAÇÃO DAS INCLINAÇÕES TRANSVERSAIS E DAS LARGURAS DE FAIXA	78
4.2.4. PERFIL LONGITUDINAL DE EIXO E BORDOS	80
4.2.5. DIMENSIONAMENTO DA CURVA DE TRANSIÇÃO (CLOTOÍDE)	81
4.2.6. EXTENSÃO DO ALINHAMENTO RECTO ABRANGIDO NO DISFARCE DA SOBREELEVAÇÃO	82
4.3. TRANSIÇÃO DA SOBREELEVAÇÃO EM ESTRADAS DE FAIXAS SEPARADAS.....	83
4.3.1. ESPECIFICIDADES	83
4.3.2. ELEMENTOS BÁSICOS NO MODELO DE DISFARCE EM ESTRADAS DE DUAS FAIXAS.....	83
4.3.3. MODELO PARABÓLICO DE DISFARCE EM EXTRADORSO	84
4.3.3.1. Generalidades	84
4.3.3.2. Disfarce parabólico do 3º grau (tipo I).....	86
4.3.3.3. Disfarce parabólico do 3º grau (tipo II).....	90
4.4. JUSTIFICAÇÃO DOS MODELOS DE DISFARCE PREFERÍVEIS.....	95
4.4.1. EM ESTRADAS DE FAIXA ÚNICA (ESTRADAS DE DUAS VIAS).....	95
4.4.2. EM ESTRADAS DE FAIXAS SEPARADAS (ESTRADAS DE VIAS MÚLTIPLAS)	96
4.5. A SOBREELEVAÇÃO E A HIDROPLANAGEM – EVENTUAIS CORRECÇÕES EM CLOTOÍDE.....	99
 5. CONCLUSÃO	 103
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
5.2. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	104
 BIBLIOGRAFIA.....	 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Variação do coeficiente de atrito em pistas secas e molhadas	6
Fig.2.2 – Comportamento do atrito em função da velocidade em pista molhada.....	7
Fig.2.3 – Aderência em função da velocidade	8
Fig.2.4 – Aderência em função da lâmina de água.....	8
Fig.2.5 – Aderência em função da macrorugosidade	9
Fig.2.6 – Aderência em função do estado do pneu	9
Fig.2.7 – Aderência em função da microrugosidade.....	10
Fig.2.8 – Fenómeno da hidroplanagem	11
Fig.2.9 – Zona de rodagem de um pneu aeronáutico que sofreu hidroplanagem por desvulcanização... ..	13
Fig.2.10 – Modelo das 3 zonas para a área de contacto e das 4 fases da hidroplanagem	15
Fig.2.11 – Esquema da acção do arrasto hidrodinâmico.....	19
Fig.2.12 – Arrasto hidrodinâmico em função da velocidade para diferentes profundidades do fluido contaminante	20
Fig.2.13 – Ilustração da largura de um pneu	21
Fig.2.14 – Efeito da zona de rodagem sobre a tracção, em condições de hidroplanagem parcial	22
Fig.2.15 – Detalhe da orientação das fibras das lonas nas carcaças dos pneus diagonal e radial	23
Fig.2.16 – Impressões de um pneu radial e de um pneu diagonal.....	23
Fig.2.17 – Efeito do tipo de pneu: diagonal ou radial na relação da velocidade de início de hidroplanagem com a pressão dos pneus	24
Fig.2.18 – Representação gráfica das expressões de Agrawall e Gallaway	26
Fig.2.19 – Modelo teórico procurando representar revestimento superficial betuminoso rugoso	28
Fig.2.20 – Modelo teórico procurando representar revestimento superficial betuminoso polido	30
Fig.2.21 – Ilustração dos conceitos de micro e macrotextura.....	34
Fig.2.22 – Influência do comprimento de onda da textura [m] nas características da superfície do pavimento	35
Fig.2.23 – Componentes do atrito quando um pneu desliza sobre um pavimento.....	37
Fig.2.24 – Participação da adesão, histerese e desgaste no atrito de deslizamento	38
Fig.2.25 – Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura lisa.....	39
Fig.2.26 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura fechada, microtextura lisa	39
Fig.2.27 – Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura áspera	40

Fig.2.28 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura fechada, microtextura áspera	40
Fig.2.29 – Modelo de superfície com macrotextura aberta e microtextura lisa.....	41
Fig.2.30 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura aberta, microtextura lisa... ..	41
Fig.2.31 – Modelo de superfície com macrotextura aberta e microtextura áspera	42
Fig.2.32 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura aberta, microtextura áspera	42
Fig.2.33 – Operação do pêndulo britânico para a determinação do valor de resistência à derrapagem.....	43
Fig.2.34 – Pêndulo Britânico	43
Fig.2.35 – Equipamento para ensaio de polimento acelerado	44
Fig.2.36 – Sequência da Técnica do ensaio da Mancha de Areia normalizada	44
Fig.3.1 – Pavimento rodoviário: acções e solicitações.....	47
Fig.3.2 – Sequência e interacção das degradações	49
Fig.3.28 – Fenómeno do bombeamento de finos.....	64
Fig.3.29 – Fenómeno do bombeamento de finos num pavimento rígido.....	64
Fig.3.31 – Encurvamento das lajes	66
Fig.4.1 – Evolução da permeabilidade na A63.....	76
Fig.4.2 – Evolução da permeabilidade em arruamentos urbanos.....	76
Fig.4.3 – Perfil transversal da faixa de rodagem de alinhamento recto	78
Fig.4.4 – Perfil transversal da faixa de rodagem do ponto de osculação entre a recta e a clotoíde	78
Fig.4.5 – Perfil transversal da faixa de rodagem relativo à osculação da clotoíde com a curva circular.....	78
Fig.4.6 – Zona de variação das inclinações transversais.....	79
Fig.4.7 – Perfil longitudinal de eixos e bordos.....	80
Fig.4.8 – Modelo de disfarce em estradas de duas faixas	83
Fig.4.9 – Perfil longitudinal com variação linear	84
Fig.4.10 – Perfil longitudinal da faixa de extradorso na zona de disfarce.....	86
Fig.4.11 – Modelo de disfarce parabólico de 3º grau na clotoíde de transição	90
Fig.4.12 – Modelo de disfarce parabólico de 3º grau no alinhamento recto	93
Fig.4.13 – Modelo de disfarce em estradas de duas vias	95
Fig.4.14 – Modelo linear para a faixa de extradorso em estradas de faixas separadas.....	96
Fig.4.15 – Modelo linear para a faixa de intradorso em estradas de faixas separadas.....	96

Fig.4.16 – Modelo parabólico de 3º grau para a faixa de extradorso em estradas de faixas separadas.....	97
Fig.4.17 – Modelo linear para a faixa de intradorso em estradas de faixas separadas	98
Fig.4.18 – Traçado de uma clotoíde em planta com linhas de escoamento das águas superficiais.....	99

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 3.3 – Abatimento longitudinal na berma	52
Foto 3.4 – Abatimento longitudinal no eixo	52
Foto 3.5 – Abatimento transversal	53
Foto 3.6 – Deformação localizada.....	53
Foto 3.7 – Ondulação	54
Foto 3.8 – Rodeiras	54
Foto 3.9 – Rodeira de classe 3	54
Foto 3.10 – Fendas de fadiga	55
Foto 3.11 – Fendas de fadiga de classe 3	55
Foto 3.12 – Fendas longitudinais	56
Foto 3.13 – Fenda transversal	56
Foto 3.14 – Fenda transversal de classe 3	56
Foto 3.15 – Pele de crocodilo.....	57
Foto 3.16 – Pele de crocodilo de malha larga.....	57
Foto 3.17 – Pele de crocodilo de malha estreita.....	58
Foto 3.18 – Desagregação superficial	59
Foto 3.19 – Pelada	59
Foto 3.20 – Pelada de classe 3.....	59
Foto 3.21 – Ninho (cova)	60
Foto 3.22 – Polimento dos agregados	61
Foto 3.23 – Exsudação	61
Foto 3.24 – Exsudação (pormenor)	61
Foto 3.25 – Subida de finos	62
Foto 3.26 – Reparação de classe 1	63
Foto 3.27 – Reparação de classe 3	63
Foto 3.30 – Escalonamento das lajes (deformação).....	65
Foto 3.32 – Fendilhamento em blocos.....	66
Foto 3.33 – Fendas longitudinais	67
Foto 3.34 – Fendas transversais.....	67
Foto 3.35 – Fendas de canto	68
Foto 3.36 – Defeitos de selagem das juntas ou fendas.....	68

Foto 3.37 – Desagregação superficial.....	69
Foto 3.38 – Defeitos das juntas	69

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Influência da textura em diversos aspectos	35
Quadro 3.1 – Famílias e Tipos de degradações	50
Quadro 3.2 – Classificação das relações entre as degradações e os factores de degradação	51
Quadro 4.1 – Valores de Δi máximo	81

SÍMBOLOS

a - largura da faixa de rodagem

A - área de contacto pneu-fluido no plano vertical

AAC - aspecto da área de contacto

B.E - bordo exterior

B.I - bordo interior

Ce - coeficiente de escoamento

C_L - coeficiente de sustentação hidrodinâmica

CCC - curva circular

CPA - coeficiente de polimento acelerado

d - inclinação do perfil longitudinal

ε - espessura

ε₁ - altura das asperezas do pavimento

fl - coeficiente de atrito longitudinal

ft - coeficiente de atrito transversal

F_d - força de arrasto

F_L - força de ascensão

h - altura do filme de água acima do topo das asperezas do pavimento

H.S - altura de areia

i - inclinação transversal da faixa de rodagem em alinhamento recto

ip - intensidade de precipitação

K - coeficiente de rugosidade

/ - desenvolvimento das linhas de escoamento

L - extensão da clotoíde

Ld - extensão do disfarce da sobrelevação em alinhamento recto

ni - número de saliências por metro de largura de escoamento

p - pressão de enchimento dos pneus

p – inclinação média das linhas de escoamento

ρ - Massa específica do fluido

P - peso

P_F - pressão hidrodinâmica actuando no pneu causada pelo fluido contaminante

Q - caudal

R - raio da curva circular

Rh - raio hidráulico

S - secção molhada

Se - sobrelevação máxima na clotoíde

Sl - sobrelargura

Sx - sobrelevação num perfil a distancia x da origem da clotoíde

μ - coeficiente de atrito

μ_a - coeficiente de atrito devido à adesão na área seca

μ_{aw} - coeficiente de atrito devido à adesão em pista molhada

μ_h - coeficiente de atrito devido à histerese

$\mu_{m\acute{a}x}$ - coeficiente de atrito máximo

μ_w - coeficiente de atrito do pavimento inundado

V - velocidade

V_B - velocidade Base

V_h - velocidade de hidroplanagem

x - perímetro molhado

ω - velocidade angular da roda livre

Z1 - zona revestida por uma espessura considerável de água (zona de hidroplanagem dinâmica)

Z2 - zona revestida por uma espessura fina de água (zona de hidroplanagem viscosa)

Z3 - zona em que a água é totalmente expulsa (zona teoricamente seca)

α - ângulo das asperezas

Δ - área de cada canal

Δi - acréscimo de inclinação no bordo de extradorso ocasionado pelo disfarce de sobrelevação (diferença de inclinação entre o bordo e o eixo)

$\Delta i_{M\acute{A}X}$ - valor máximo tabelado e aceite para diferença de inclinação entre o bordo exterior e o eixo da estrada

$\Delta i_{M\acute{I}N}$ - valor mínimo tabelado e aceite para diferença de inclinação entre o bordo exterior e o eixo da estrada

δ - diferença de inclinação entre os bordos de intradorso e extradorso

ABREVIATURAS

ASTM - American Society of Testing Materials

BNP - British Pendulum Number

CD - Catálogo de Degradações

EP - Estradas de Portugal

ESDU - Engineering Sciences Data Unit

IRI - Índice Internacional de Irregularidade

ICAO - International Civil Aviation Organization (Organismo das Nações Unidas para os assuntos de aviação civil em todo o mundo)

JAЕ - Junta Autónoma de Estradas

OSEC - Observatório de Segurança das Estradas e Cidades

NASA - National Aeronautics and Space Administration (Agência Norte-Americana para os assuntos de Aeronáutica e Espaço)

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O pavimento é uma estrutura constituída por um sistema formado por várias camadas de espessura finita, apoiadas na fundação de um terreno compactado e de terreno natural, com a finalidade de suportar directamente o tráfego.

“A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período, sob a actuação das acções do tráfego, e das condições climáticas que ocorram”. (Branco, 2006)

O pavimento possui características de elevada resistência e baixa deformabilidade, bem como permeabilidade e aderência adequadas à circulação de veículos, tendo em atenção parâmetros como a intensidade de tráfego, o tipo de tráfego, a velocidade máxima permitida e o tipo de clima predominante na região em que se localiza a estrada.

Deste modo, o pavimento rodoviário tem de estar adequadamente dimensionado de forma a ter a melhor resposta possível para as solicitações resultantes da aplicação de cargas provenientes dos veículos e da acção dos agentes climáticos (características de resistência, deformabilidade e de permeabilidade compatíveis). Ao mesmo tempo tem que oferecer aos utentes um nível de serviço adequado, permitindo que a circulação se realize em condições de segurança, conforto e economia (superfície de circulação perfeitamente regular, desempenada em toda a zona de circulação dos veículos) compatível em termos ambientais e ainda corresponder às exigências das diferentes classes de tráfego e taxas de crescimento expectáveis, durante a sua vida útil (geralmente por volta dos 20 a 30anos).

A um pavimento deve exigir-se qualidade estrutural e funcional. Quanto aos aspectos funcionais, os parâmetros mais relevantes estão relacionados à segurança contra a derrapagem ou aquaplanagem, a qual é função de uma boa interacção pneu-pavimento. Esta interacção depende da macrotextura e microtextura do revestimento, bem como das boas condições de drenagem superficial.

A água superficial deve ser intersectada e desviada de forma a diminuir os efeitos de erosão superficial, para sistemas de retenção e captação de água (valetas). É necessário garantir a conservação e duração da super e infra-estrutura, protegendo as estradas contra a acção das águas superficiais. As águas de escorrência numa estrada devem ser canalizadas para as linhas de água, para evitar situações de estagnação à superfície do pavimento podendo provocar a hidroplanagem e a penetração em fendas do pavimento degradando as características resistentes da plataforma. A drenagem superficial destina-se a interceptar as águas que chegam ao corpo da estrada provenientes de áreas adjacentes, e a captar as águas pluviais que incidam directamente sobre ela, conduzindo-as para local onde desaguar,

sem causar danos. Muitas vezes apesar da existência de órgãos de drenagem (por exemplo valetas), as águas superficiais não conseguem divergir até estes e imobilizam-se no pavimento. Quando estes casos acontecem, as águas estagnadas podem percolar para o interior do pavimento provocando a degradação das características deste e podem provocar movimentos de migração de água que podem levar à ruína total ou parcial do pavimento. Outro problema que pode ocorrer é a perda de aderência entre o pneu e o pavimento derivada da presença de um agente contaminante, que no seguimento desta dissertação estará relacionada com a existência de uma película de água. O fenómeno de redução do atrito levará à possibilidade de ocorrência da aquaplanagem.

Relativamente aos aspectos estruturais, a deterioração por fadiga dos revestimentos tem-se acelerado em função das fracas fundações e de percolações de água não detectadas.

Verifica-se um aumento da necessidade de realização de acções de conservação para repor a qualidade, quer estrutural, quer funcional, pois é notório que os pavimentos apresentam uma degradação prematura da sua qualidade.

O desempenho dos pavimentos, entendido como a capacidade de suportar as cargas do tráfego e como a capacidade de oferecer uma superfície de circulação confortável e segura, é estudado actualmente quanto à sua componente estrutural através da vida residual. Quanto à componente funcional, o desempenho é estudado a partir da observação dos parâmetros de estado da superfície, além das condições de atrito pneu-pavimento.

1.2. JUSTIFICATIVA DO TEMA E A SUA IMPORTÂNCIA

A preocupação geral quanto às condições geométricas, funcionais e estruturais dos pavimentos rodoviários, relacionadas com o factor de segurança de circulação, desperta cada vez mais o interesse em estudar os factores que levam à diminuição da vida útil destes pavimentos.

Para além da hidroplanagem ser responsável por um número significativo de acidentes rodoviários, é interessante estudar as medidas praticáveis para combater este risco, bem como outros aspectos de degradação precoce dos pavimentos.

1.3. OBJECTIVOS

Este trabalho tem como principal objectivo averiguar os impactos funcionais e estruturais dos pavimentos rodoviários devido à presença de águas superficiais.

Outro objectivo é recomendar medidas de combate às águas superficiais para reduzir potenciais riscos de hidroplanagem.

Para se atingir o objectivo são analisados parâmetros de atrito, textura e drenabilidade dos revestimentos. Procura-se relacionar os dados de atrito, textura e condição drenante, pretendendo identificar os possíveis efeitos do tráfego sobre as condições de aderência pneu-pavimento proporcionadas pelos revestimentos.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, onde se inclui este, **Introdução**, na qual se realiza uma apresentação do tema e se enunciam os objectivos da mesma.

No capítulo 2, **Impactos Funcionais**, descrevem-se os principais impactos nos pavimentos rodoviários.

No capítulo 3, **Combate às Águas Superficiais**, é feita uma exposição das medidas preventivas, tais como, pavimentos drenantes e as sobreelevações.

No capítulo 4, **Impactos Estruturais**, aborda-se as degradações dos pavimentos, referindo os aspectos negativos das águas estagnadas nos pavimentos, quer os directos (causas de degradação) como os indirectos (influenciam na degradação mais acelerada).

Por fim no capítulo 5, **Conclusão**, apresentam-se as principais conclusões alcançadas.

2

IMPACTOS FUNCIONAIS

2.1. INTRODUÇÃO

A presença das águas pluviais sobre os pavimentos vai ter efeitos funcionais e estruturais. Os segundos correspondem usualmente às patologias induzidas nos pavimentos por infiltração das águas pluviais.

Os efeitos funcionais negativos resultam do prejuízo que as águas superficiais provocam na segurança e nível de serviço de circulação.

Chama-se drenabilidade da superfície de um pavimento a um factor essencial para a manutenção de um nível de serviço desejado e de segurança de circulação, tornando-se assim uma necessidade vital.

Uma superfície com fracas características de drenagem contribui para a ocorrência de acidentes resultantes do fenómeno de hidroplanagem, perda de visibilidade e aparecimento de inúmeras patologias.

Para a obtenção de uma drenagem adequada do pavimento, devem ser implementadas algumas técnicas de projecto como inclinação transversal e a construção de pavimentos com camadas de desgaste porosas.

Quando por razões geométricas, for imperioso ter localmente inclinações transversais muito fracas e, em simultâneo, a plataforma for larga, propõe-se o uso de métodos de disfarce parabólicos do 3º grau da sobrelevação.

“Na realidade é na zona de extradorso e adjacente às clotoídes, por existir inversão da sobrelevação, que este dispositivo geométrico se revela fundamental para o afastamento das águas superficiais”. (Adalberto França, 2008)

2.2. PERDA DE ADERÊNCIA EM PISTAS MOLHADAS

2.2.1. INTRODUÇÃO

A avaliação da segurança envolve vários aspectos, entre eles os relacionados com o pavimento. Além da geometria e irregularidade superficial, é importante avaliar o atrito pneu-pavimento, principalmente em dias de chuva que envolve a quantificação da resistência à derrapagem que é função da aderência.

Este parâmetro é de carácter evolutivo no tempo e depende de vários factores. Alguns estão inerentes ao tipo e ao estado do pavimento (textura superficial da pista), outros são da responsabilidade do condutor (tipo e estado dos pneus relacionado com o grau, a pressão de enchimento, a carga por roda e

a velocidade de circulação) e ainda depende das condições climáticas (chuva, neve, gelo) e da época do ano (temperatura e pluviosidade).

O atrito disponível em pista molhada é consideravelmente inferior ao encontrado quando a pista está seca. Isso decorre do facto de não se conseguir expulsar completamente o fluido contaminante que se encontra entre o pneu e a superfície da pista.

A fina película de água que permanece na área de contacto reduz substancialmente a componente principal do atrito, a adesão.

Na medida em que a velocidade aumenta, o tempo de contacto do pneu com o pavimento reduz-se, diminuindo também, o tempo disponível para que o processo de expulsão da água se complete. Por esse motivo, o atrito em pistas molhadas diminui com a velocidade e é proporcional à área da zona de contacto onde ocorre efectivamente o contacto directo entre pneu e pavimento (parte da área de contacto em que foi possível a completa expulsão do fluido contaminante). Mesmo que esse contacto directo entre o pneu e o pavimento ocorra em áreas muito pequenas (asperezas dos agregado), o atrito disponível é proporcional ao somatório dessas pequenas áreas.

Este facto é mostrado na figura seguinte, onde são comparados os resultados dos coeficientes de atrito medidos numa pista em condição seca e molhada, em função da velocidade, mantidas todas as demais características do veículo de teste.

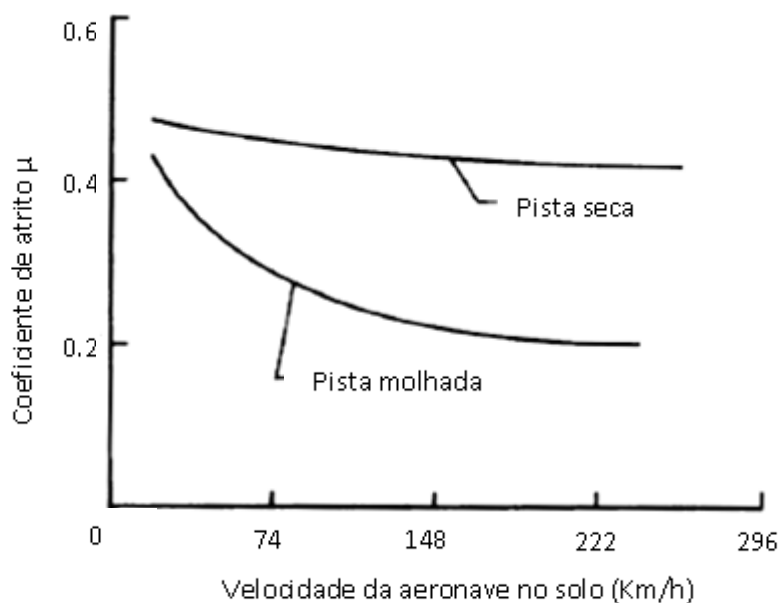


Fig.2.1 – Variação do coeficiente de atrito em pistas secas e molhadas. Adaptado de Horne e Dreher (1963)

Para se obter o atrito necessário à frenagem em pistas molhadas, é essencial que se desloque ou se rompa a película do fluido contaminante que se interpõe entre o pneu e a pista, de forma a obter contacto semelhante ao encontrado em pista seca.

Entende-se por fluido contaminante qualquer material que possa afectar o contacto pneu-pavimento. Na literatura destacam-se a água, o gelo e a neve. Considerando as condições climáticas predominantes do nosso país, o fluido contaminante citado na presente pesquisa será referente à água.

A figura seguinte mostra a relação do comportamento do atrito em função da velocidade de deslocamento, na presença de água sobre a superfície do pavimento. Segundo o estudo de Comfort em 2001, a partir da velocidade de hidroplanagem (V_h) o atrito é praticamente nulo.

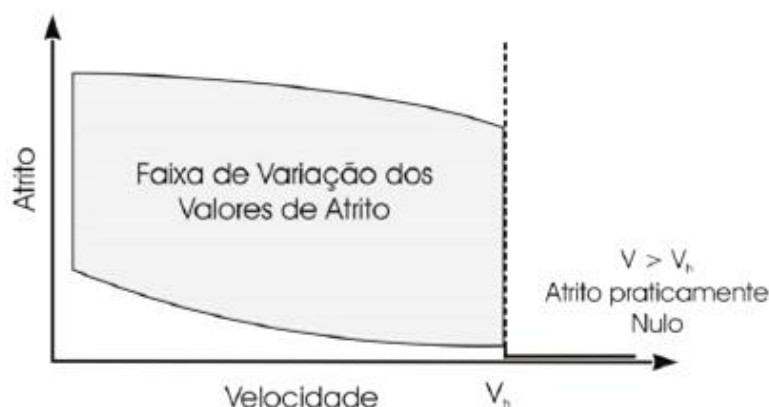


Fig.2.2 – Comportamento do atrito em função da velocidade em pista molhada. Adaptado de Comfort (2001)

2.2.2. REDUÇÃO DOS COEFICIENTES DE ADERÊNCIA

O atrito de um pavimento pode ser avaliado a partir do coeficiente de atrito longitudinal que está relacionado com a distância de paragem, e do coeficiente de atrito transversal que avalia a segurança de circulação em zona de curva.

O polimento de um pavimento muito usado em situações de chuva, mesmo não atingindo fenómenos de hidroplanagem, vai provocar uma redução significativa dos coeficientes de aderência longitudinal e transversal.

A redução destes coeficientes tem implicações práticas e preocupantes a nível da segurança. Com a redução do coeficiente de aderência longitudinal, os choques em cadeia por aumento da distância de frenagem são potenciados, já a redução do coeficiente transversal potencia as derrapagens.

As figuras a seguir representadas estabelecem a forma de variação dos coeficientes de aderência em relação a parâmetros como a velocidade, lâmina de água, macrorugosidade, estado do pneu, CPA agregados.

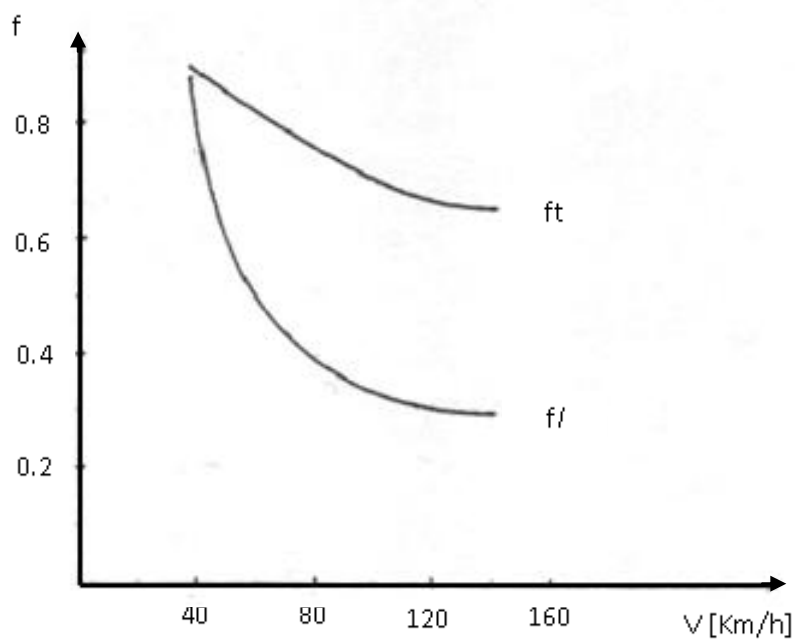


Fig.2.3 – Aderência em função da velocidade. Adaptado de Adalberto França (2008)

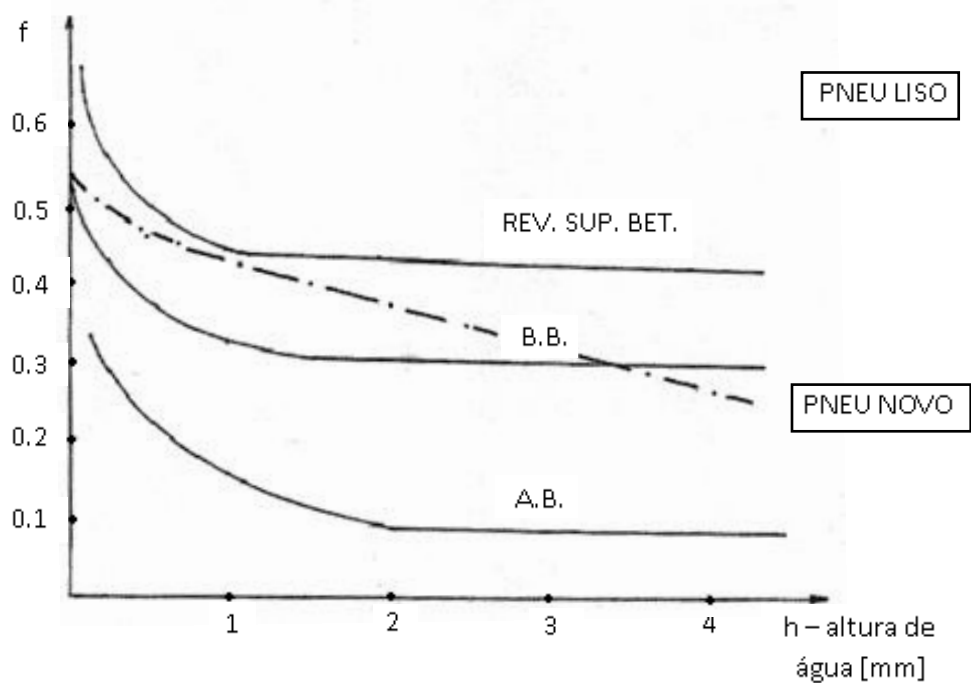


Fig.2.4 – Aderência em função da lâmina de água. Adaptado de Adalberto França (2008)

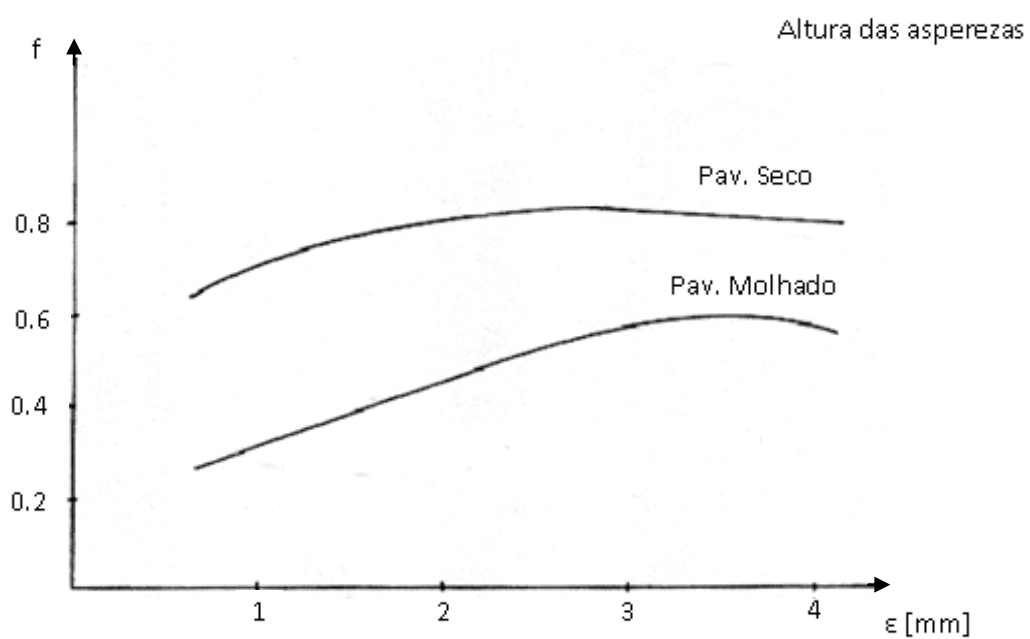


Fig.2.5 – Aderência em função da macrorugosidade. Adaptado de Adalberto França (2008)

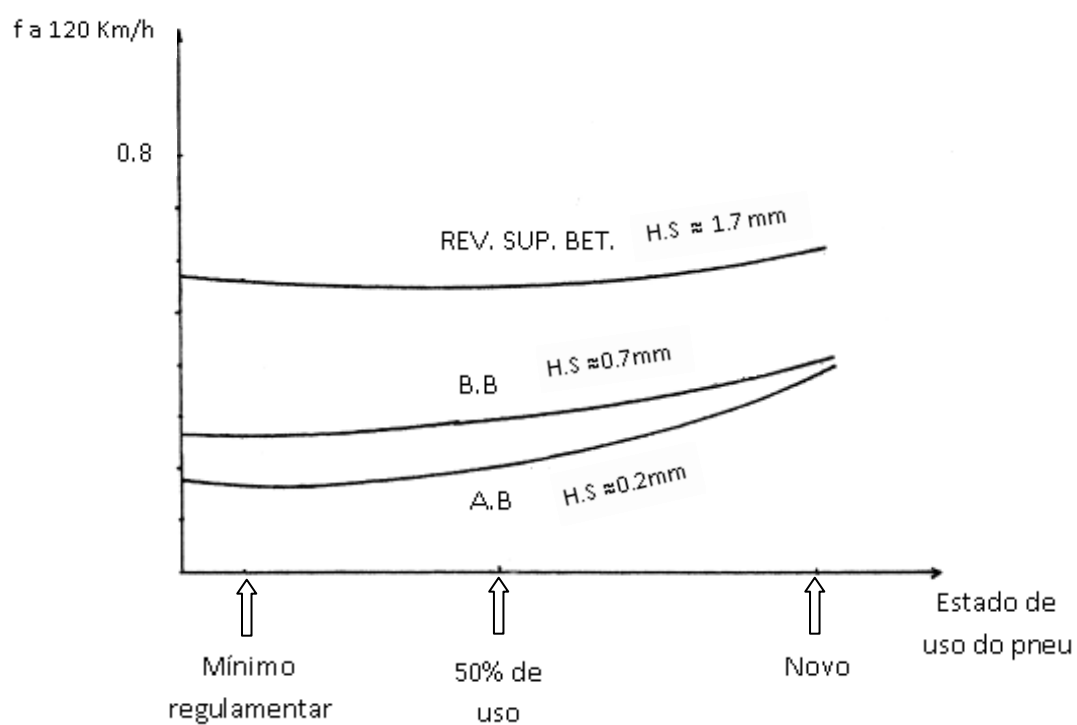


Fig.2.6 – Aderência em função do estado do pneu. Adaptado de Adalberto França (2008)

Sendo H.S – altura de areia

$$H.S \leq 0.2mm \Rightarrow a \text{ eliminar}$$

$$0.2 < H.S \leq 0.4mm \Rightarrow V < 80Km/h$$

$$0.4 < H.S \leq 0.8mm \Rightarrow 80 < V < 120Km/h$$

$$0.8 < H.S \leq 1.2mm \Rightarrow V \geq 120Km/h$$

$$H.S > 1.2mm \Rightarrow \text{zonas perigosas}$$

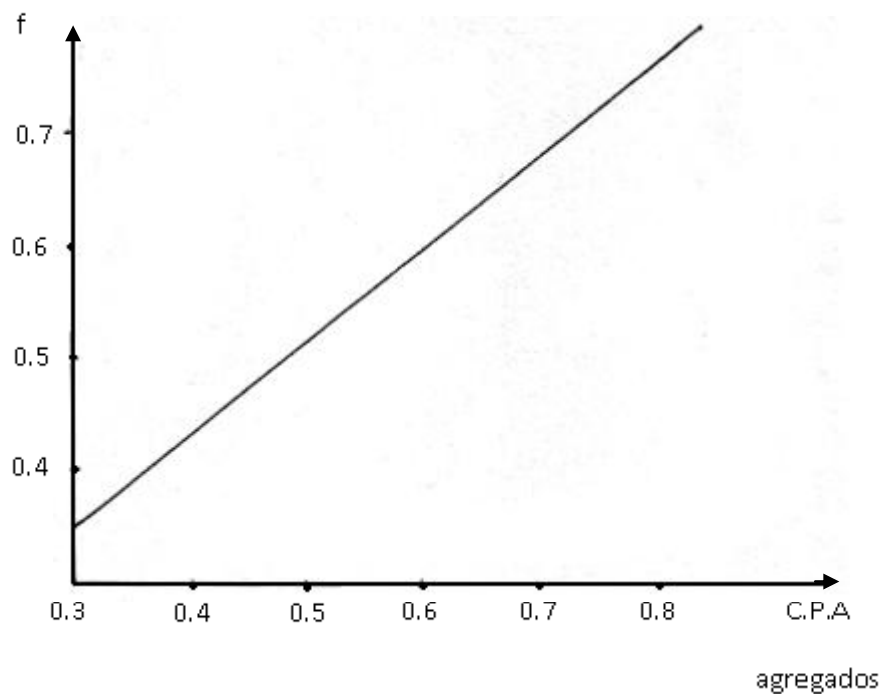


Fig.2.7 – Aderência em função da microrugosidade. Adaptado de Adalberto França (2008)

$$C.P.A < 0.35 \Rightarrow a \text{ rejeitar ou misturar}$$

$$0.35 \leq C.P.A < 0.45 \Rightarrow \text{razoável. traçado favorável}$$

$$0.45 \leq C.P.A < 0.55 \Rightarrow \text{Bom}$$

$$C.P.A \geq 0.55 \Rightarrow \text{Muito bom. traçados desfavoráveis}$$

2.3. AUMENTO DO RISCO DE HIDROPLANAGEM

2.3.1. INTRODUÇÃO

Devido à presença de uma película de água que se interpõe entre o pneu e o pavimento pode ser iniciado um dos principais factores influenciadores de acidentes rodoviários, ou seja, a hidroplanagem (termo técnico vulgarmente conhecido como aquaplaning), ocorre quando os pneus perdem o contacto com o pavimento devido à presença de um filme de água não rompido pelos pneus ou pela textura da pista.

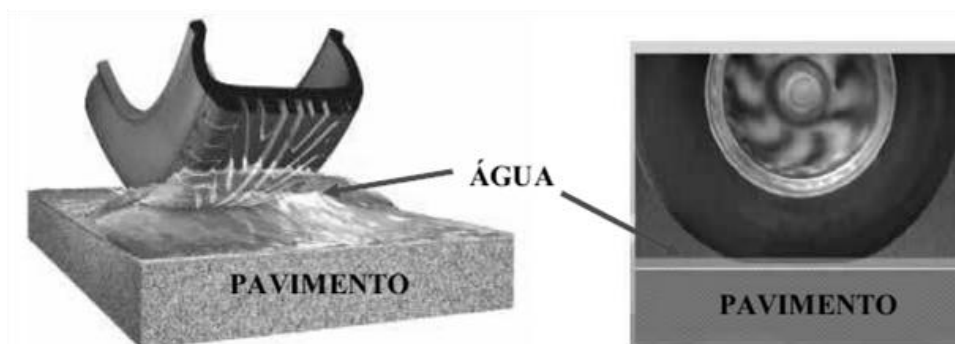


Fig.2.8 – Fenómeno da hidroplanagem. [1]

Nesta situação os pneus deixam de rolar sobre a superfície e passam a flutuar e escorregar sobre ela. A manutenção do contacto entre as superfícies é essencial, portanto, para evitar a hidroplanagem. Através desse contacto pode-se garantir o atrito, que é mobilizado quando uma das superfícies está em movimento em relação à outra. Quando o atrito fica reduzido (praticamente nulo), pode-se perder o controlo da direcção e a frenagem fica também prejudicada.

2.3.2. TIPOS DE HIDROPLANAGEM

Conhece-se actualmente três tipos de hidroplanagem:

- Viscosa
- Dinâmica
- Por desvulcanização

2.3.2.1. Hidroplanagem Viscosa

A hidroplanagem viscosa ocorre para velocidades relativamente baixas, devido ao efeito da viscosidade da água, que se opõe à sua expulsão da área de contacto entre o pneu e o pavimento.

Esse tipo de hidroplanagem é favorecido em superfícies mais lisas, condição esta que ocorre com maior frequência nas áreas impregnadas por borracha proveniente do desgaste dos pneus.

De um modo geral, a hidroplanagem viscosa ocorre durante as operações de frenagem, na faixa de velocidade situada entre aquela em que ocorre a hidroplanagem dinâmica e velocidades bastantes reduzidas, mesmo que a película de água seja extremamente fina.

2.3.2.2. Hidroplanagem Dinâmica

Quando um veículo se desloca sobre um pavimento cuja superfície se encontre coberta de água, o pneu do veículo desloca a água para a frente e para os lados, de modo que a roda possa avançar e de maneira que se estabeleça contacto entre o pneu e a pista. Na frente de contacto, onde o pneu choca com a água, forma-se uma onda de pressão de intensidade correspondente ao impulso transmitido pelo pneu à água. Esta pressão (que é proporcional ao quadrado da velocidade da roda e à densidade da água) deforma o pneu de uma forma tal que, as porções de água subsequentes são capazes de penetrar na área de contacto entre o pneu e a pista e sustentar, parcialmente, a carga vertical do pneu.

Acima de uma certa espessura de camada de água (espessura crítica) e de determinada velocidade característica (velocidade de hidroplanagem), a água “invade” completamente a área de contacto e deixa de existir contacto entre o pneu e a pista. O pneu sofre a hidroplanagem dinâmica completa, não havendo perdas de energia cinética por adesão e ocorrendo apenas perdas por histerese no interior da área de contacto.

Um aumento da espessura da camada de água acima do seu valor crítico não influencia de forma considerável, a velocidade de hidroplanagem dinâmica.

Experimentalmente, pode ser mostrado que a hidroplanagem dinâmica completa para pneus diagonais, rodando sobre uma pista contaminada por uma lâmina de água de espessura maior ou igual à crítica, ocorre a uma velocidade de:

$$V_h = 1.77 \times \sqrt{p} \quad (1)$$

Onde:

V_h [m/s] = velocidade de hidroplanagem dinâmica para a roda girando sem deslizamento

p [kPa] = pressão de enchimento dos pneus

Para pneus radiais, rodando sobre uma pista contaminada por uma lâmina de água de espessura maior ou igual á crítica, a hidroplanagem completa ocorre a uma velocidade de:

$$V_h = 1.29 \times \sqrt{p} \quad (2)$$

Segundo testes específicos, demonstrou-se que a velocidade de hidroplanagem dinâmica pode ser expressa apenas em função da pressão dos pneus, ou seja, quanto maior a pressão dos pneus, maior a velocidade necessária para que ocorra a hidroplanagem.

Isso resulta do facto de que, quanto maior a velocidade, menor será o tempo disponível para completar o processo de eliminação da água da área de contacto e maior deverá ser a pressão dos pneus para conseguir a completa expulsão da água.

Silva em 1981, argumentava que a espessura crítica da lâmina de água necessária para a ocorrência desse tipo de hidroplanagem, em uma pista com textura fechada e lisa, é de cerca de 2 a 3mm, podendo chegar a 10mm em pistas com macrotextura aberta.

Note-se que essa espessura de água relativamente pequena, que cria condições favoráveis à hidroplanagem, pode ser produzida por uma chuva forte e de curta duração.

Logo, pode-se concluir que, um factor que contribui para evitar a ocorrência de hidroplanagem é a inclinação transversal dos pavimentos de modo a favorecer o escoamento superficial das águas da chuva.

2.3.2.3. Hidroplanagem por Desvulcanização

Quando a velocidade de deslocamento de um veículo é superior à velocidade de hidroplanagem, o veículo sofre hidroplanagem completa, a qual ocorre devido à profunda película de água e à velocidade.

Devido à macrotextura do pavimento e à inexistência de rotação, a borracha na área de contacto fica sujeita a repetidas deformações locais que, devido às propriedades visco-elásticas da borracha, sobreaquecem a área de contacto. Se esse processo perdurar por um longo tempo, a temperatura na área de contacto pode alcançar um nível em que a borracha perde as suas qualidades elásticas e torna-se plástica.

Quando isso acontece, grande parte das perdas de energia cinética por histerese deixam de existir, e se o pavimento possuir textura fechada e lisa, a hidroplanagem viscosa continuará, mesmo a baixas velocidades. Devido à baixa resistência da borracha no estado plástico, as perdas por adesão, histerese e desgaste serão pequenas e as rodas começarão a girar tardiamente, muito abaixo da velocidade na qual a hidroplanagem dinâmica cessa.

Este processo denomina-se de hidroplanagem por Desvulcanização, pelo que um pneu exposto a tal processo apresenta danos locais (a zona de rodagem derrete-se parcialmente).

O aspecto de um pneu que sofreu hidroplanagem por desvulcanização é mostrado na figura 2.9.



Fig.2.9 – Zona de rodagem de um pneu aeronáutico que sofreu hidroplanagem por desvulcanização. Goodyear (2003)

2.3.2.4. Hidroplanagem Combinada – Modelo das 3 Zonas e 4 Fases

A ocorrência da hidroplanagem totalmente viscosa ou inteiramente dinâmica é extremamente rara. O normal é que dois tipos de hidroplanagem ocorram simultaneamente. Pesquisas realizadas pela NASA mostraram que, dentro da área de contacto entre o pneu e o pavimento, existem três zonas distintas:

- Zona 1 (Z1): zona revestida por uma espessura considerável de água (zona de hidroplanagem dinâmica);
- Zona 2 (Z2): zona revestida por uma espessura fina de água (zona de hidroplanagem viscosa);
- Zona 3 (Z3): zona em que a água é totalmente expulsa (zona teoricamente seca, cujo atrito contribui com mais intensidade para a desaceleração e o controle direccional do veículo).

Essas zonas podem ser visualizadas na figura 2.10, que apresenta o esquema da área de contacto de um pneu deslocando-se sobre uma superfície molhada.

A zona 1 é a região onde ocorre o impacto do pneu com a superfície do fluido, gerando pressões suficientes para deslocar o fluido. A maior parte do fluido é lançada para a frente e para os lados, na forma de spray, outra parte é forçada a se deslocar através das ranhuras (sulcos) da zona de rodagem, ou pelos canais e micro-canais existentes na macrotextura da superfície do pavimento. Como resultado, a pressão hidrodinâmica gerada nessa região causa a deformação da zona de rodagem e permite a penetração do fluido na área de contacto, como mostra a figura 2.10a. Na zona 1 verifica-se a presença de uma espessura considerável de fluido entre as superfícies do pneu e do pavimento. Alguns autores consideram que nesta região desenvolvem-se apenas forças correspondentes ao arrasto hidrodinâmico. Outros autores consideram que nesta região também ocorrem as perdas por histerese, em maior ou menor grau, dependendo da espessura do fluido contaminante.

A zona 2 é uma região de transição, onde ainda permanece uma fina camada de fluido. O efeito da viscosidade do fluido impede que a sua saída da área de contacto ocorra num tempo menor que o tempo de passagem da roda e, em função disso, a pressão do fluido é mantida. O fluido sob pressão impede o contacto directo entre as superfícies do pneu e do pavimento. Essa fina camada de fluido sob pressão é rompida em alguns pontos localizados, onde as asperezas da superfície do pavimento geram tensões de contacto superiores à pressão do fluido. Alguns autores consideram que nesta região desenvolvem-se apenas as perdas por histerese, as quais não dependem do contacto directo entre as superfícies. Outros autores consideram que a acção das perdas depende da microtextura da superfície do pavimento: quanto mais áspera a superfície, maior o número de pontos com contacto directo e, consequentemente, maiores as perdas por adesão.

A zona 3 é a região onde predomina o contacto seco entre as superfícies, onde as perdas por histerese e adesão actuam plenamente e, em consequência, é o local da área de contacto onde é gerada a maior parte das perdas por atrito.

O coeficiente de atrito entre pneu e pavimento em condições de pista inundada depende da participação relativa das zonas 1,2 e 3.

A figura 2.36 mostra o efeito da velocidade de deslocamento da roda sobre a dimensão das zonas 1, 2 e 3.

A velocidade de deslocamento na figura 2.10b é maior do que a velocidade na figura 2.10a. Assim, no caso 2.10b, a zona 1 é maior e estende-se em direcção à parte traseira da área de contacto (lado direito da figura), tomando o espaço das zonas 2 e 3, que assumem a forma de “ferradura”.

Na figura 2.10c, a velocidade de deslocamento é ainda maior do que nos casos anteriores e já não há o contacto seco entre as superfícies do pneu e do pavimento.

Nesta condição o atrito pneu-pavimento é bastante reduzido, dependendo principalmente da microtextura da superfície do pavimento, que ainda pode actuar na zona 2 remanescente.

Finalmente, a figura 2.10d mostra o deslocamento da roda a uma velocidade em que já não existe mais contacto seco entre pneu e pavimento (velocidade maior do que a velocidade de hidroplanagem – V_h). Nesta condição a roda encontra-se na condição de hidroplanagem dinâmica completa e o atrito reduz-se a valores insignificantes, com a perda do controle direccional do veículo.

Na literatura encontram-se diversos modelos que procuram explicar o atrito desenvolvido entre o pneu e o pavimento na condição de deslocamento em regime de hidroplanagem combinada.

O modelo constante da equação (3) baseia-se nas hipóteses de que há perdas por histerese na zona 1 (representadas pelo coeficiente de atrito μ_h), e que há perdas por adesão na zona 2 (representadas pelo coeficiente de atrito μ_{aw}). A magnitude desses coeficientes depende da espessura do fluido contaminante e da microtextura da superfície, respectivamente.

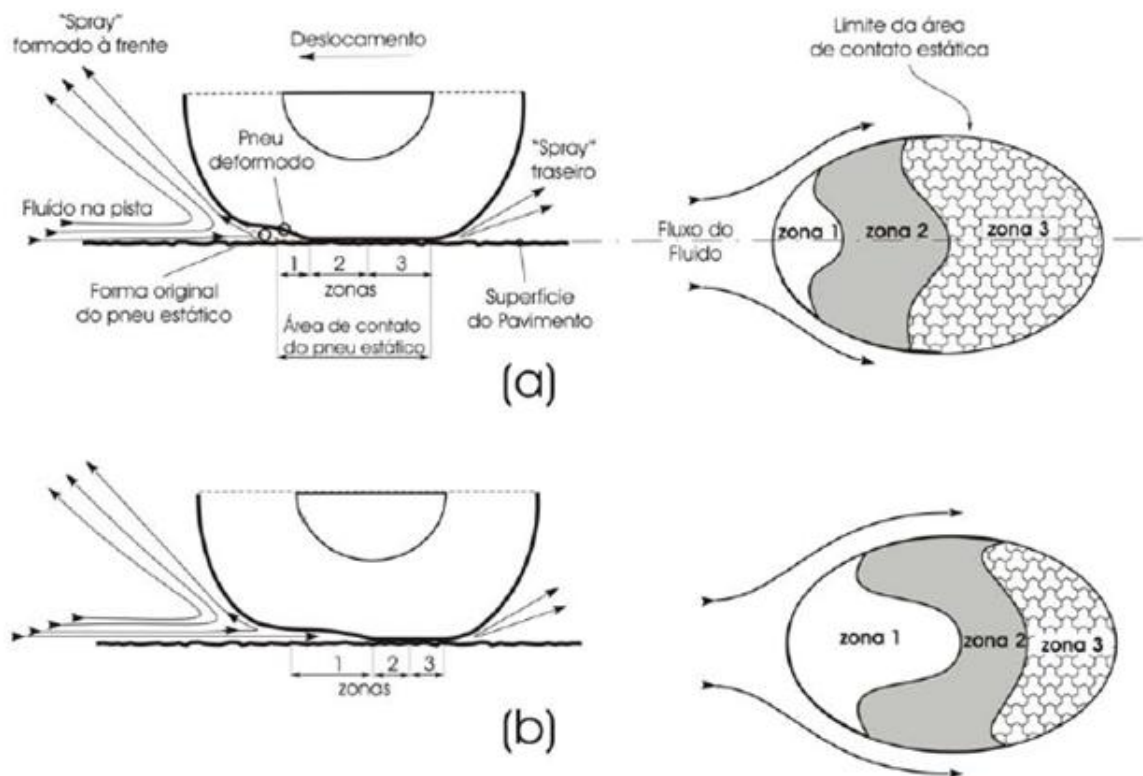


Fig.2.10 – Modelo das 3 zonas para a área de contacto e das 4 fases da hidroplanagem. Adaptado de Balkwill (2003)

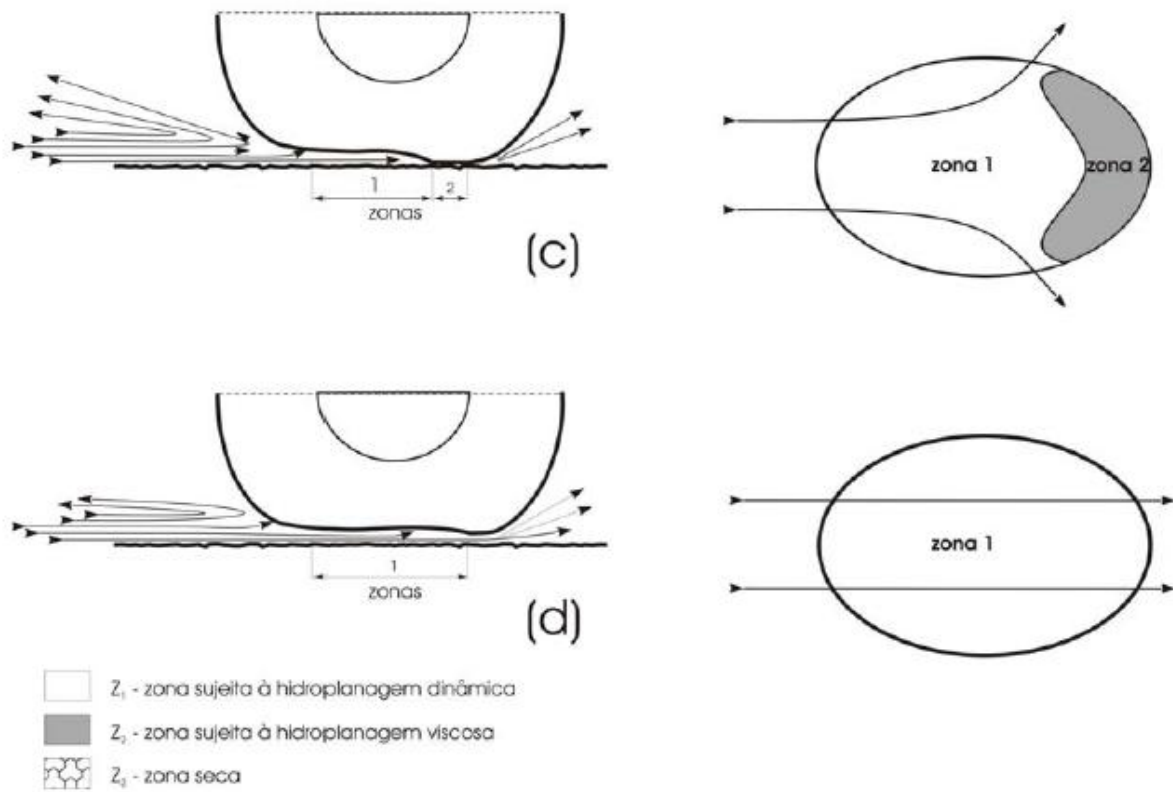


Fig.2.10 cont. – Modelo das 3 zonas para a área de contacto e das 4 fases da hidroplanagem. Adaptado de Balkwill (2003)

Se não se considerar a resistência ao movimento e a resistência hidrodinâmica da água, o coeficiente de atrito do pneu, em movimento sobre um pavimento inundado, pode ser expresso por:

$$\mu_w = \frac{Z_1 \times \mu_h + Z_2 \times (\mu_{aw} + \mu_h) + Z_3 \times (\mu_a + \mu_h)}{A} \quad (3)$$

Onde:

μ_w = coeficiente de atrito do pavimento inundado

μ_a = coeficiente de atrito devido à adesão na área seca (zona 3)

μ_h = coeficiente de atrito devido à histerese

μ_{aw} = coeficiente de atrito devido à adesão na área molhada.

A equação mostra que a zona seca da área de contacto (Z3) contribui substancialmente para a capacidade de frenagem do pneu, uma vez que nesta região actuam integralmente os atritos por histerese e adesão, como num pavimento seco.

Na zona 2, em que existe uma película fina de água separando o pneu do pavimento, as perdas por histerese (que são menos intensas do que as perdas por adesão), estão sempre presentes. Nesta zona, perdas por adesão podem ocorrer em maior ou menor grau. Nesta região de ocorrência de hidroplanagem viscosa, a magnitude das perdas por adesão variam em função da microtextura. Sobre uma pista de microtextura extremamente áspera, tudo se passa mais próximo do comportamento da zona seca, como se Z2 não se desenvolvesse e, com o aumento da velocidade, Z1 substituisse gradualmente a Z3 - Horne e Buhlmann (1983); conforme Lenke e Graul, (1986). Ou, de outro modo, numa superfície com microtextura extremamente áspera, a zona 2 praticamente funciona como área seca para efeito de atrito. As asperezas rompem a película de água garantindo o contacto das superfícies do pneu e do pavimento e as perdas por adesão passam a actuar de forma muito próxima à da área seca (Z3).

No outro extremo, numa microtextura muito lisa, praticamente não ocorrem perdas por adesão na zona 2, pois não há asperezas para perfurar a película de água sob pressão e, em consequência, não há contacto directo entre as superfícies do pneu e do pavimento. Neste caso a zona 2 terá um comportamento próximo da zona 1 para efeitos de atrito, pois praticamente só actua a histerese.

A velocidade para a hidroplanagem dinâmica completa será a mesma se a profundidade da lâmina de água for maior ou igual ao seu valor crítico. As perdas por histerese ocorrem por toda a área de contacto ($Z1+Z2+Z3=A$) com intensidade variável em função da espessura do fluido contaminante.

Se a roda começar a girar sobre um pavimento molhado, cuja microtextura seja lisa, a zona 2 (onde existe hidroplanagem viscosa), irá formando-se progressivamente.

Esta área desenvolve-se da parte da frente para a de trás da zona de contacto e diminui Z3. Numa situação em que a espessura da lâmina de água ultrapasse o valor crítico, com o aumento da velocidade, desenvolvem-se pressões hidrodinâmicas na frente da roda, e a água gradualmente penetrará na área de contacto. Assim, forma-se uma zona de hidroplanagem dinâmica Z1, que penetra em Z2.

À medida que a velocidade aumentar, Z3 desaparecerá gradualmente e, ao mesmo tempo, Z1 aumentará. A uma determinada velocidade crítica (se a profundidade da lâmina de água for superior à crítica), Z1 cobrirá toda a área de contacto e o pneu ficará totalmente exposto à hidroplanagem dinâmica. Nesta situação, perde-se a capacidade de frenagem e o controlo direcciona do veículo.

2.3.3. FACTORES DE QUE DEPENDE A AQUAPLANAGEM

A expulsão da água na área de contacto entre o pneumático e o pavimento é fundamental para proporcionar o atrito necessário á segurança da circulação. Esta expulsão das águas superficiais dependerá de diversos factores, que são importantes para melhor perceber o fenómeno da hidroplanagem, dos quais de destacam:

- Espessura da lâmina de água
- O pneumático
- A rugosidade da camada de desgaste do pavimento
- A velocidade

2.3.3.1. Espessura da lâmina de água

Para que ocorra a hidroplanagem é essencial a presença do chamado fluido contaminante (água) na área de contacto entre o pneu e o pavimento. A viscosidade e a massa específica são duas

características básicas de um fluido, que afectam o desempenho do atrito entre o pneu e o pavimento e influenciam no potencial de ocorrência de hidroplanagem. Por viscosidade entende-se a resistência do fluido ao cisalhamento interno.

O tempo que o pneumático demora a penetrar o filme de fluido existente no pavimento está relacionado com a viscosidade do fluido. Quanto maior a viscosidade, maior o tempo gasto para penetrar o filme, pois maior é a resistência que o fluido impõe ao escoamento.

A massa específica do fluido é uma medida da inércia que o pneu tem de vencer para atingir o pavimento. À medida que o pneu se movimenta através da camada de fluido, ele altera a quantidade de movimento deste, o que resulta numa força de reacção actuando na superfície da zona de rodagem do pneu.

Essa força, denominada de pressão hidrodinâmica, pode ser estimada a partir da seguinte expressão Horne e Dreher (1963):

$$P_F = 0,5 \cdot C_L \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (4)$$

Onde:

P_F - pressão hidrodinâmica actuando no pneu causada pelo fluido contaminante

V - velocidade de deslocamento do veículo

ρ - Massa específica do fluido

C_L - coeficiente de sustentação hidrodinâmica

A - área de contacto pneu-fluido no plano vertical

No caso dos pneus se deslocarem sobre uma pista contaminada com água, a expressão pode ser aproximada:

$$P_F \cong 0,5 \cdot V^2 \quad (5)$$

Onde:

P_F [kPa] - pressão hidrodinâmica actuando no pneu causada pelo fluido contaminante

V [m/s] - velocidade de deslocamento do veículo

Ou seja, a uma velocidade de 22,3 m/s (cerca de 80 km/h), o fluido exercerá uma pressão aproximada de 250kPa sobre o pneu. Pode-se assim concluir que, mesmo para uma velocidade relativamente baixa a pressão do fluido é suficiente para promover uma deformação da zona de rodagem do pneu para trás (força de arrasto F_d) e para cima (força de ascensão F_L), permitindo a penetração de um filme delgado de água na área de contacto.

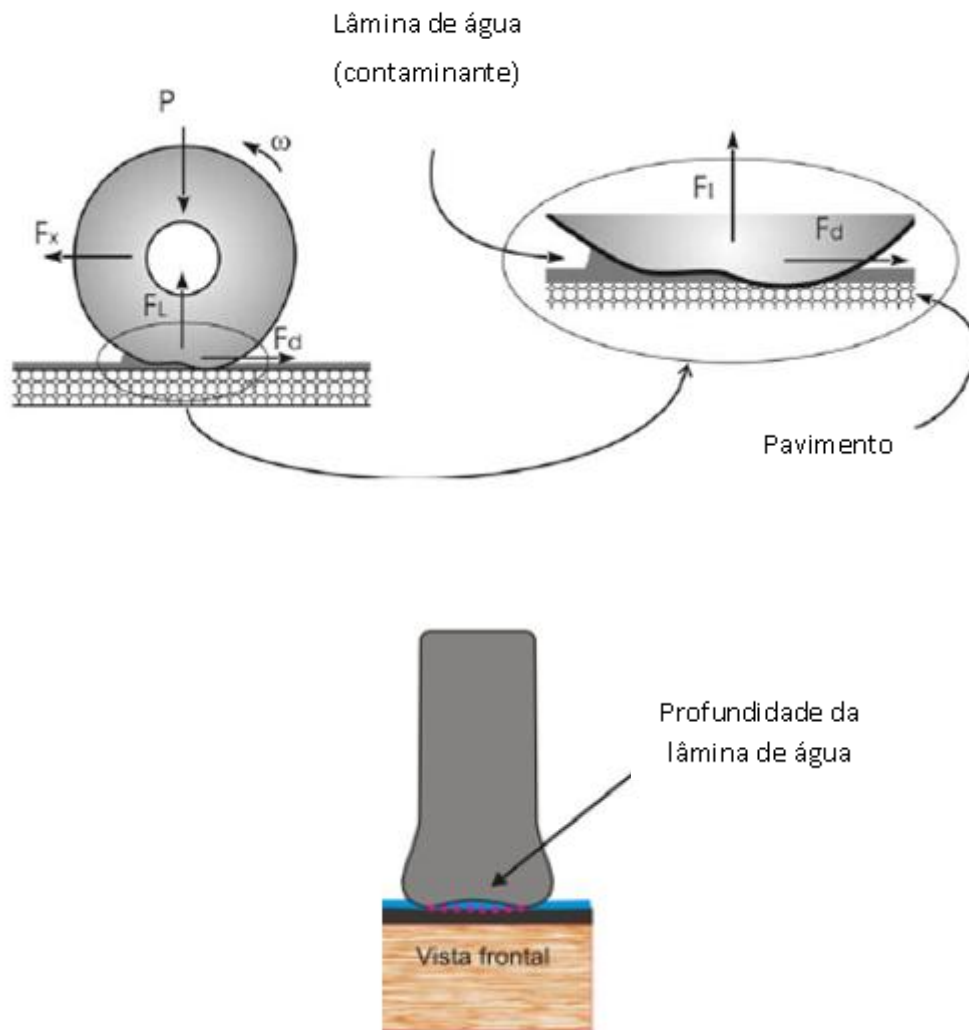


Fig.2.11 – Esquema da acção do arrasto hidrodinâmico. Adaptado de Rodrigues Filho (2006) e [2]

A profundidade da lâmina de fluido, ao longo da trajectória do pneu, também é um factor muito importante na determinação do potencial de hidroplanagem para uma determinada combinação pneu-pavimento.

Quanto maior a profundidade do fluido (espessura da lâmina de água), maior as forças inerciais que vão agir no pneu: arrasto F_d e ascensão F_L .

Em consequência, maior será a probabilidade de ser excedida a capacidade de drenagem das ranhuras do pneumático, combinadas com a macrotextura do pavimento. Assim sendo, a profundidade da lâmina de água sobre o pavimento tem relação directa com a probabilidade de ocorrência de hidroplanagem.

No entanto, a profundidade do fluido não tem influência na velocidade de início da aquaplanagem. A aquaplanagem ocorre a partir de uma profundidade mínima de fluido, denominada profundidade crítica. Caso a profundidade do fluido seja menor do que a profundidade crítica não ocorrerá a hidroplanagem, independentemente da velocidade de deslocamento do veículo. A partir da

profundidade crítica, caso o veículo atinja a velocidade de hidroplanagem, ocorrerá então a hidroplanagem.

Na figura 2.12 conclui-se que a velocidade de início da hidroplanagem dinâmica é independente da profundidade do fluido contaminante. A mesma roda é deslocada numa superfície de testes, com diferentes profundidades de água sobre a superfície, mantendo constantes a carga de roda e a pressão do pneu. Nos três casos o arrasto hidrodinâmico cresce com a velocidade até um valor máximo, onde se identifica o início da hidroplanagem. A velocidade correspondente a esse valor máximo é a velocidade de hidroplanagem.

Embora o arrasto hidrodinâmico (força) cresça com a profundidade da água, a velocidade de início da hidroplanagem é praticamente a mesma para os três casos.

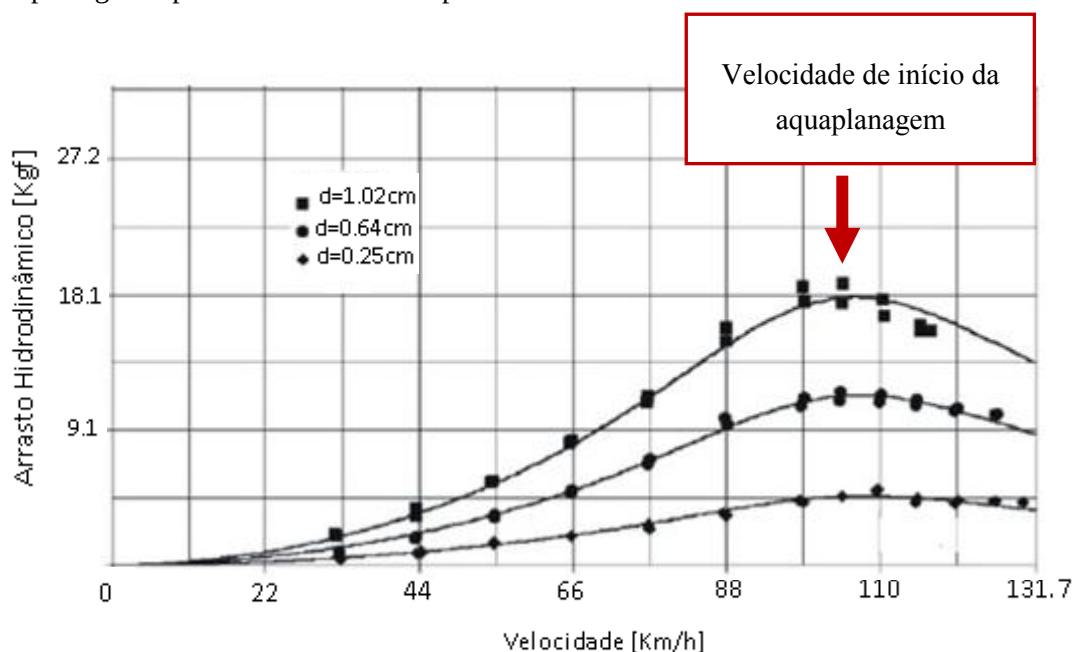


Fig.2.12 – Arrasto hidrodinâmico em função da velocidade para diferentes profundidades do fluido contaminante; pneu pequeno na pista de teste; carga de roda=90.7 Kgf; pressão do pneu=2.03Kgf/cm². Adaptado de Balkwill (2003).

2.3.3.2. O pneumático

A pressão de enchimento do pneu é um factor muito importante na determinação da velocidade de hidroplanagem. Quanto maior a pressão, maior a rigidez do pneu e maior a resistência da zona de rodagem a deformar-se sobre a acção de arrasto da água. Isto é, a zona de rodagem irá deformar-se menos perante a resistência hidrodinâmica, evitando uma maior penetração da água na área de contacto.

Aumentando-se a pressão de enchimento, eleva-se a pressão na área de contacto e a extensão da penetração da água diminui, aumentando assim a velocidade de início da hidroplanagem.

Uma correlação aproximada entre a velocidade à qual ocorre a aquaplanagem e a pressão de enchimento do pneu é dada por:

$$V_h(\text{Km/h}) = 1.6093 \times 10.35 \times (\text{pressão de enchimento})^{1/2}$$

Com pressão de enchimento em psi (libra por polegada quadrada).

$$V_h(\text{Km/h}) = 1.6093 \times 10.35 \times 3.54 \times \sqrt{\text{pressão de enchimento}} \quad (6)$$

Com pressão de enchimento em Kg/cm²

Esta expressão é equivalente à calculada em 2.3.2.2 a propósito do pneumático.



Fig.2.13 – Ilustração da largura de um pneu. [3]

Um factor negativo que é importante referir é a largura do pneu. O pneu não deve ter largura exagerada para facilitar a expulsão da água presente no pavimento. O ideal é ter um pneu fino para expulsar melhor a água e obter melhor contacto. No entanto, este pneu não pode ser fino demais para permitir uma adequada aderência.

Outro factor relativo aos pneus é o desenho da escultura da zona de rodagem. Desenhos adequados, tais como raias ao longo do perímetro, tendem a elevar a velocidade de início de hidroplanagem, quando comparados com os pneus lisos.

Outro efeito positivo das ranhuras (sulcos do pneu) é o aumento da profundidade mínima de água necessária para que ocorra a hidroplanagem.

Dados experimentais demonstram também que a perda de tracção devido à hidroplanagem parcial é consideravelmente menor em pneus com zona de rodagem esculpida, mesmo quando a profundidade da lâmina de água é maior do que a profundidade das ranhuras do pneu.

Segundo estudos de Horne relativos a pneus de aeronaves, este facto é evidente, pelo que as ranhuras aumentam a profundidade mínima de fluido contaminante necessário para a ocorrência de hidroplanagem parcial como está ilustrado na figura 2.14.

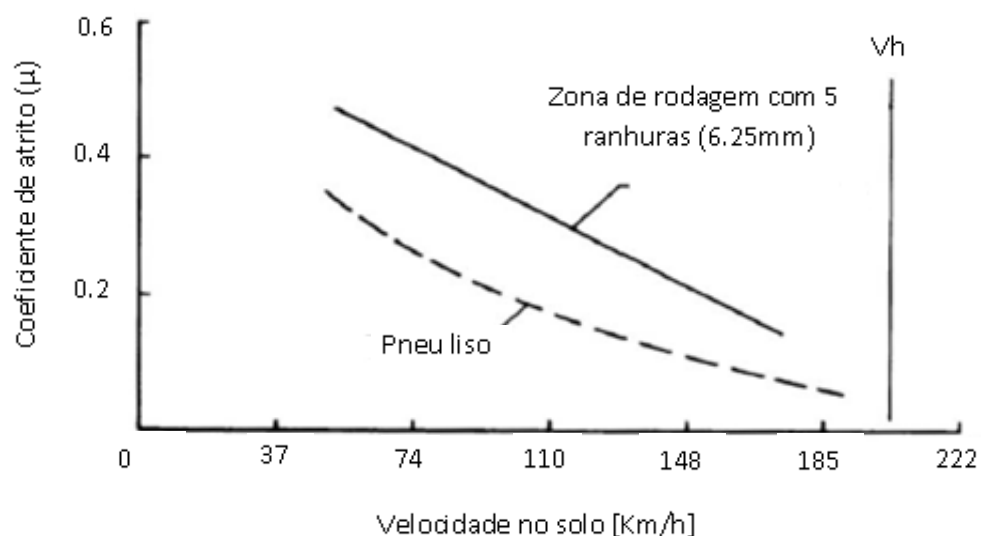
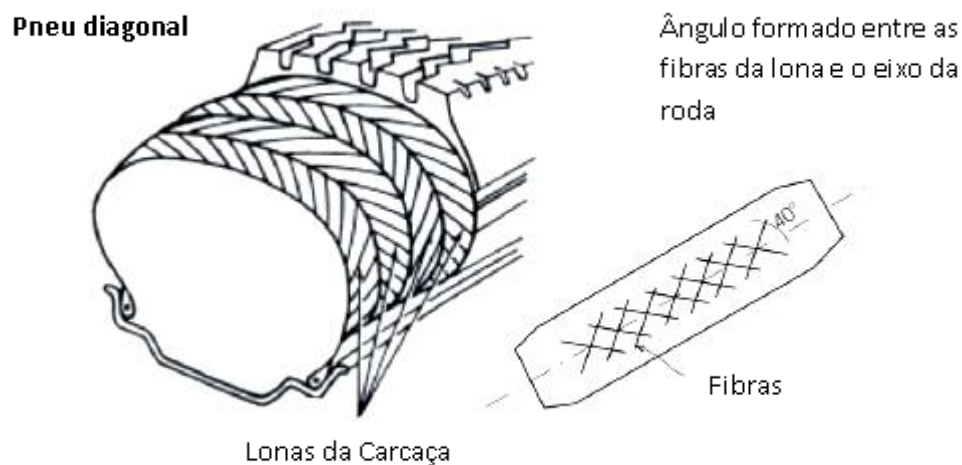


Fig.2.14 – Efeito da zona de rodagem sobre a tracção, em condições de hidroplanagem parcial; pneu aerodinâmico 32x8.8; lâmina de água de 7.5mm; carga=4.760Kg e $p=1.034\text{kPa}$, Langley, NASA; Adaptado de Horne (1963)

Finalmente, a estrutura do pneu (de acordo com o tipo de pneu: diagonal ou radial) tem influência na velocidade em que se inicia a hidroplanagem.



Pneu Radial

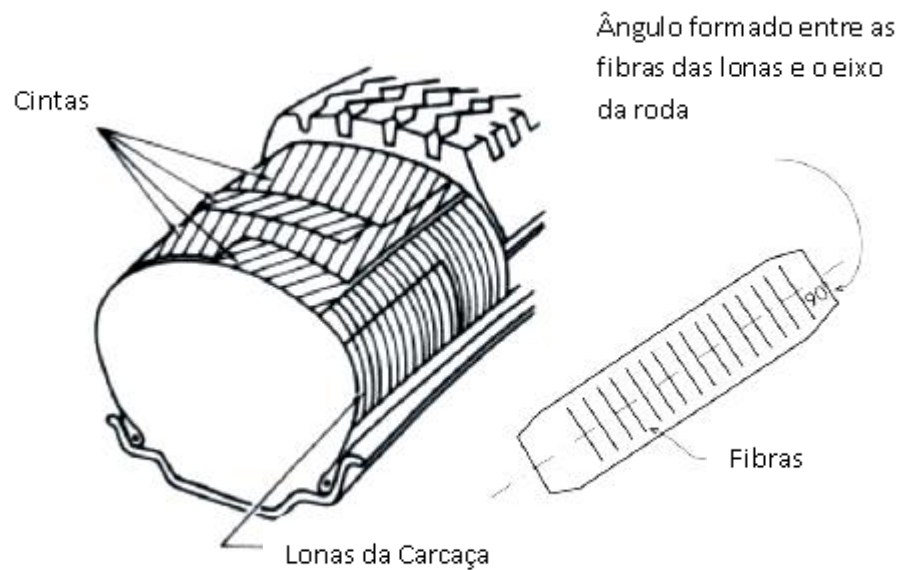


Fig.2.15 – Detalhe da orientação das fibras das lonas nas carcaças dos pneus diagonal e radial. Adaptado de Wong (2001)

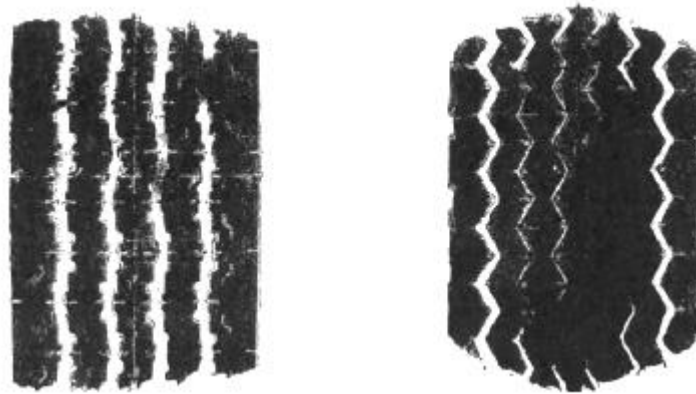


Fig.2.16 – Impressões de um pneu radial e de um pneu diagonal com carga por roda de 4.173kgf e pressão de enchimento de 717Kgf/cm². Adaptado de Beer e Fisher (1997)

Van Es *et al.* (2001) demonstraram que pneus radiais apresentam velocidades de hidroplanagem cerca de 27% menores do que pneus diagonais, em condições similares de operação. A diferença parece ser causada pela forma da área de contacto, especialmente a relação entre a largura e o comprimento da área de contacto (AAC). Esse facto é observado na figura 2.17.

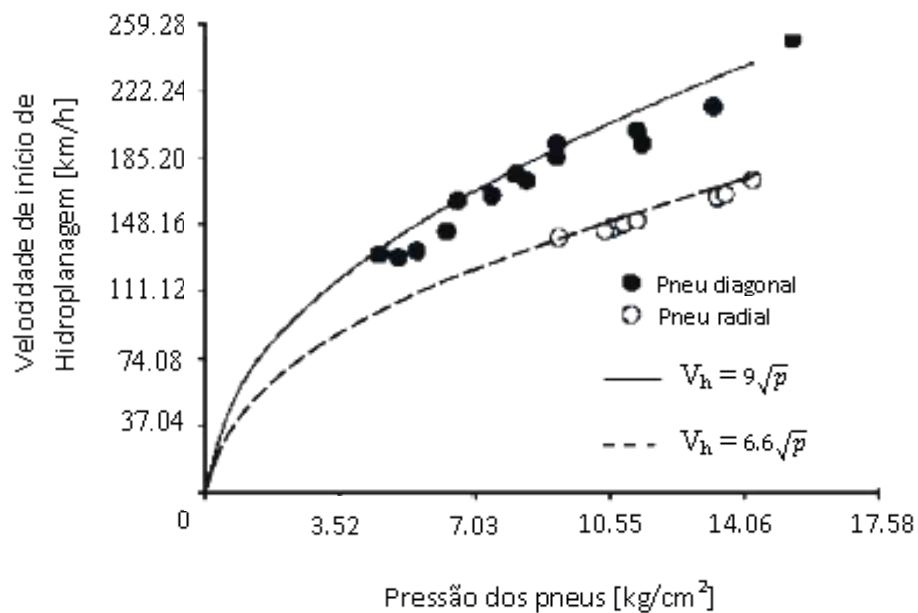


Fig.2.17 – Efeito do tipo de pneu: diagonal ou radial na relação da velocidade de início de hidroplanagem com a pressão dos pneus. Adaptado de Van Es *et al* (2001)

2.3.3.3. A velocidade

O cálculo da velocidade a que ocorre o aquaplaning resulta do cruzamento de vários dados, entre os quais está a macrorugosidade do pavimento, a intensidade da chuva e o comprimento das linhas de água que escorrem no pavimento.

De acordo com a investigação experimental de especialistas norte-americanos, os estudos empíricos revelaram que o risco de um condutor perder o domínio da direcção do veículo, existe para velocidades iguais ou superiores a 80km/h, num pavimento com 0.6mm de altura de areia, com uma chuvada de 5mm/h, considerada uma precipitação fraca.

Nestes estudos não foi tido em conta o pneumático, devido á diversidade de estados de conservação dos mesmos, bem como as diferentes pressões de enchimento a eles afectas.

Agrawall e Gallaway estabeleceram correlações entre a velocidade de início da hidroplanagem e os factores referidos anteriormente, as quais foram possíveis através das expressões seguintes.

Foi efectuada uma conversão de unidades, a fim de se evitar unidades de medida britânicas.

Equação de Gallaway:

$$V = 4.580 \times (1.181 \times \varepsilon_1 + 1)^{0.06} \times A \quad (7)$$

Onde:

$$A \text{ é o maior valor de } \left\{ \begin{array}{l} \frac{12.639}{h^{0.06}} + 3.507 \\ \left[\frac{22.35}{h^{0.06}} - 4.970 \right] \times H/S^{0.14} \end{array} \right.$$

Esta expressão é válida para valores de $h > 2.413\text{mm}$.

Onde:

V [Km/h] – velocidade de início de hidroplanagem;

ϵ_1 [mm] – altura das asperezas do pavimento;

h [mm] – altura do filme de água acima do topo das asperezas do pavimento;

H/S [mm] – altura de areia do respectivo ensaio.

Equação de Agrawall:

$$V = 96.899 \times h^{-0.259} \quad (8)$$

Tendo os símbolos os mesmos significados da expressão de Gallaway.

Esta expressão tem aplicação prática para valores de $h < 2.413\text{mm}$

Os coeficientes de correlação encontrados foram de 85% para a expressão de Gallaway e de 82% para a de Agrawall.

Na figura 2.18 estão representadas as duas equações, tendo sido usada na expressão de Gallaway os valores de:

$$H/S = 0.508\text{mm}$$

e

$$\epsilon_1 = 2.54\text{mm}$$

Em relação ao exposto, põe-se o problema do cálculo da espessura da lâmina de água acima do topo das asperezas (h) para que conhecidas e aceites as expressões empíricas citadas se possa determinar a velocidade de hidroplanagem incipiente.

Como se constata, para velocidades superiores a 80Km/h, a aquaplanagem depende apenas de h (equação de Agrawall) que é a situação mais importante de considerar.

Por outro lado, não se pode esquecer que a altura do filme de água acima das cristas das asperezas é também dependente, ainda que indirectamente, da forma e elevação dessa mesma macrorugosidade.

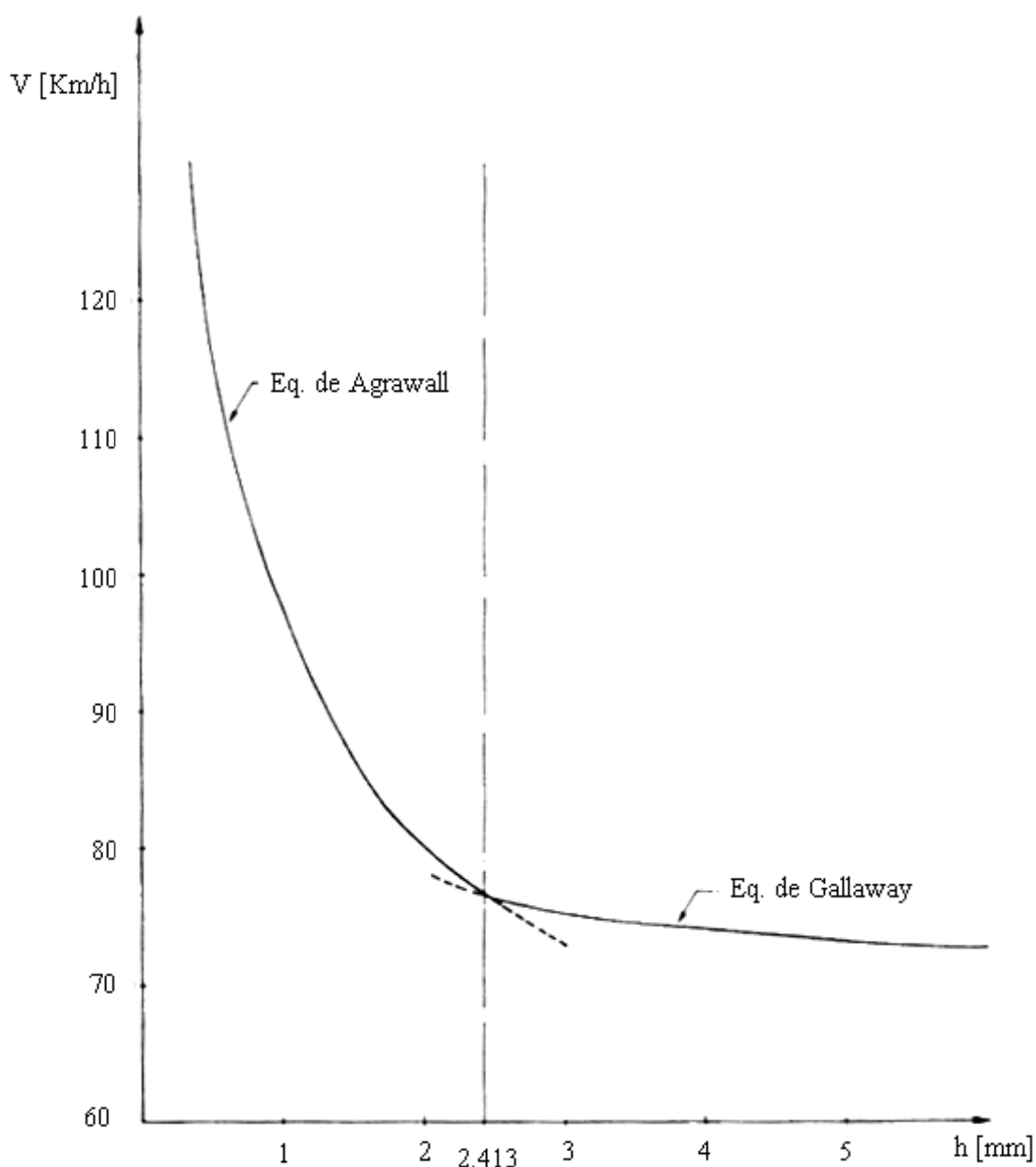


Fig.2.18 – Representação gráfica das expressões de Agrawall e Gallaway. Adaptado de Adalberto França (1988)

Berthier em 1967 já havia usado o método de Manning-Strickler, considerando-o como válido embora, demonstrasse algumas cautelas a ter face à pequena diferença existente entre a altura de água resultantes das habituais chuvadas e a altura das asperezas. Considerou o raio hidráulico se uma superfície ilimitada igual à altura de água e obteve a expressão seguinte:

$$h = \left(\frac{l \times ip \times 10^{-5}}{36K \times \sqrt{p}} \right)^{3/5} \quad (9)$$

onde:

h [m] – altura de água em relação à superfície do pavimento

l [m] - desenvolvimento das linhas de escoamento

i_p [mm/h] – intensidade de precipitação

K [$m^{1/3}/s$] – coeficiente de rugosidade

p – inclinação média das linhas de escoamento

Apresentar-se-á de seguida o desenvolvimento desta expressão. No entanto, esta expressão de Berthier é limitativa pois apenas considerou o caso do escoamento de água em alinhamento recto e patamar, o que simplificou o problema pois que l seria igual à largura da faixa de rodagem (ou via) de extradorso e p seria a inclinação transversal da superfície do pavimento. Considerou ainda, o pavimento como uma superfície lisa.

Com estes pressupostos, concluiu ainda que com salvaguardas, que o risco de hidroplanagem não se colocaria se a estrada fosse de duas vias e estivesse correctamente perfilada. Como se sabe, a situação crítica ocorre em estradas de faixas de rodagem separadas e para esse caso a resposta não é tão imediata.

ESTUDOS EMPIRICOS

Caso 1 - Caso de macrorugosidade e microrugosidade elevadas

Revestimento superficial betuminoso rugoso

Neste caso recorre-se a um modelo teórico que se esquematiza na Fig. 2.19, em que:

h [m] – altura da água acima da crista das asperezas

ε_1 [m] – altura das asperezas

α – ângulo das asperezas

n_i – número de saliências por metro de largura de escoamento

l [m] – desenvolvimento das linhas de escoamento

C_e – coeficiente de escoamento

p – inclinação média segundo a linha de escoamento

K [$m^{1/3}/s$] – coeficiente de rugosidade

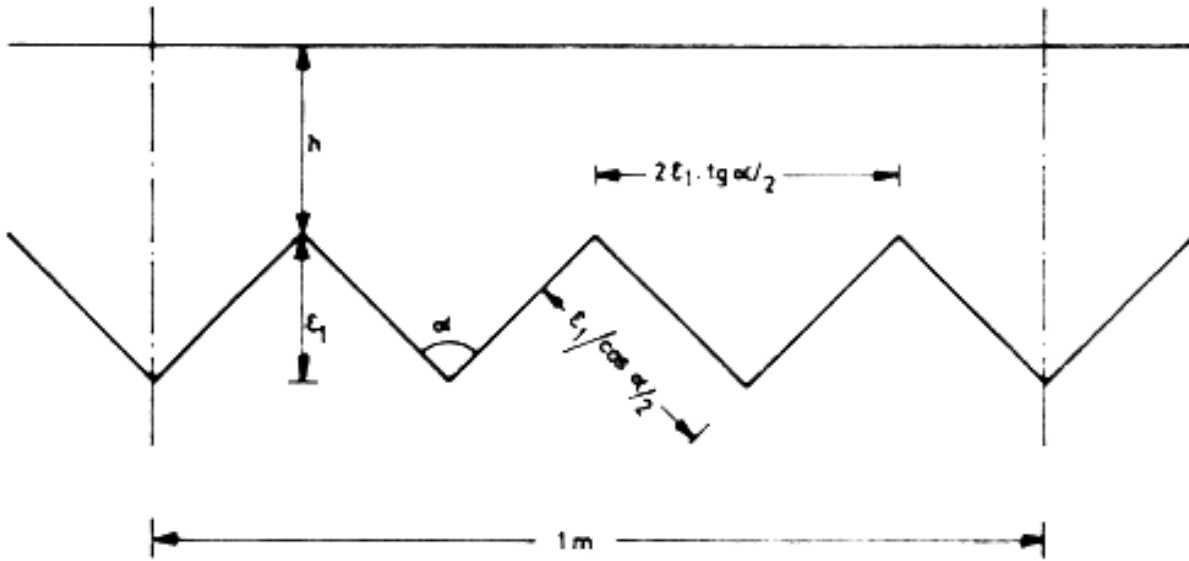


Fig. 2.19 – Modelo teórico procurando representar revestimento superficial betuminoso rugoso. Adalberto França (1988)

Da Fig. 2.19 será:

$$ni = \frac{1}{2 \cdot \varepsilon_1 \cdot tg \frac{\alpha}{2}} \quad (10)$$

Sendo Δ a área de cada triângulo invertido de base $2 \cdot \varepsilon_1 \cdot tg \frac{\alpha}{2}$, virá: (11)

$$\Delta = 2 \times \varepsilon_1 \times tg \frac{\alpha}{2} \times \frac{\varepsilon_1}{2} = \varepsilon_1^2 \times tg \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

E então a área de todos os canais de escoamento será:

$$ni \times \Delta = ni \times \varepsilon_1^2 \times tg \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2\varepsilon_1 tg \frac{\alpha}{2}} \times \varepsilon_1^2 \times tg \frac{\alpha}{2} = \frac{\varepsilon_1}{2} \quad (13)$$

A área da lâmina de água acima das cristas será: h

Então a secção molhada será, por metro de largura de escoamento:

$$S = h + \frac{\varepsilon_1}{2} \quad (14)$$

E o perímetro molhado:

$$x = ni \cdot 2 \cdot \frac{\varepsilon_1}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{1}{2 \varepsilon_1 \cdot \tan \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{2 \varepsilon_1}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (15)$$

O raio hidráulico R_h virá então:

$$R_h = \frac{h + \frac{\varepsilon_1}{2}}{\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}} = h + \frac{\varepsilon_1}{2} \times \sin \frac{\alpha}{2} \quad (16)$$

O caudal será dado por $Q = l \times ip$ se $C_e=1$ e por estarmos a considerar a largura unitária medida na direcção perpendicular à de escoamento.

A expressão tradicional de Manning-Strickler é:

$$Q = K \times S \times R_h^{2/3} \times p^{1/2} \quad (17)$$

Ou seja neste caso, usando a metodologia de Berthier

$$l \times ip = K \times \left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right) \times \left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right)^{2/3} \times \left(\sin \frac{\alpha}{2}\right)^{2/3} \times p^{1/2} \quad (18)$$

virá então

$$\left(h + \frac{\varepsilon_1}{2}\right)^{5/3} = \frac{l \times ip}{K \times \left(\sin \frac{\alpha}{2}\right)^{2/3} \times p^{1/2}} \quad (19)$$

E finalmente

$$h = \left[\frac{l \times ip}{K \times \left(\sin \frac{\alpha}{2}\right)^{2/3} \times p^{1/2}} \right]^{0.6} - \frac{\varepsilon_1}{2} \quad (20)$$

em que ip [$m^3/m^2 \cdot s$] é a intensidade de precipitação

Para este trabalho tomou-se $\alpha=60^\circ$ e o coeficiente de rugosidade igual a 60, para tentar traduzir a presença da microrugosidade dos materiais inertes constituintes deste revestimento superficial betuminoso.

Para a fixação de ε_1 que não será naturalmente sempre o mesmo, tomou-se como base os valores médios apresentados por Lucas [4], Brillet e Langanier [5].

Assim e considerando que a altura de areia para um revestimento superficial betuminoso rugoso (H/S) é da ordem dos 2,5mm e que, ainda segundo Lucas a relação $\varepsilon_1/H/S = 2$, então $\varepsilon_1 = 5\text{mm}$, o que acarretará finalmente:

$$h = \left[\frac{l \times ip}{60 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \times p^{\frac{1}{2}}} \right]^{0.6} - \frac{0.005}{2} \quad (21)$$

com:

h [m] – altura da lâmina de água acima das cristas das asperezas

l [m] – desenvolvimento das linhas de escoamento

p – inclinação média da linha de escoamento

ip [$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] – intensidade de precipitação

Caso 2 - Caso de macrorugosidade elevada e microrugosidade baixa

Revestimento superficial betuminoso polido

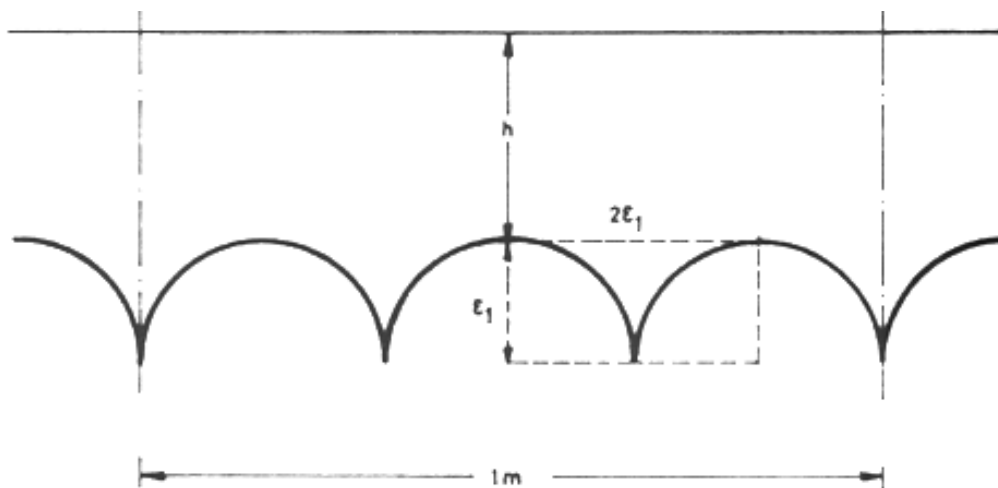


Fig. 2.20 – Modelo teórico procurando representar revestimento superficial betuminoso polido. Adalberto França (1988)

O modelo teórico seguido foi análogo ao anterior, em que os triângulos representativos da macrorugosidade dos inertes se viram substituídos por semi-circunferências procurando simular o polimento dos inertes, como está esquematizado na Fig. 2.20.

De acordo com a simbologia utilizada no parágrafo anterior o número de saliências por metro de largura de escoamento será:

$$ni = \frac{1}{2 \cdot \varepsilon_1} \quad (22)$$

A área de cada canal, Δ é:

$$\Delta = 2\varepsilon_1^2 - 2\left(\frac{\pi\varepsilon_1^2}{4}\right) = \varepsilon_1^2 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (23)$$

E então a área de todos os canais de escoamento será:

$$ni \times \Delta = ni \times \varepsilon_1^2 \times \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2\varepsilon_1} \varepsilon_1^2 \times \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\varepsilon_1 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)}{2} \quad (24)$$

A área do filme de água acima do topo das asperezas será: h

Então a secção molhada será, por metro de largura de escoamento

$$S = h + \frac{\varepsilon_1 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)}{2} \quad (25)$$

E o perímetro molhado

$$x = ni \cdot \frac{2 \pi \varepsilon_1}{2} = \frac{1}{2 \varepsilon_1} \cdot \pi \varepsilon_1 = \frac{\pi}{2} \quad (26)$$

O raio hidráulico R_h virá então:

$$R_h = \frac{h + \varepsilon_1 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) / 2}{\frac{\pi}{2}} = h + \frac{\varepsilon_1}{2} \times \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \times \frac{\pi}{2} \quad (27)$$

Identicamente ao que se fez para o caso anterior

$$Q = l \times ip = K \times S \times R_h^{2/3} \times p^{1/2} \quad (28)$$

Substituindo para o caso concreto:

$$l \times ip = K \times \left(h + \frac{\varepsilon_1 \times \left(2 - \frac{\pi}{2} \right)}{2} \right) \times \left(h + \frac{\varepsilon_1 \times \left(2 - \frac{\pi}{2} \right)}{2} \right)^{2/3} \times \left(\frac{2}{\pi} \right)^{2/3} \times p^{1/2}$$

e

$$h = \left[\frac{l \times ip}{K \times \left(\frac{2}{\pi} \right)^{2/3} \times p^{1/2}} \right]^{0.6} - \frac{\varepsilon_1 \times \left(2 - \frac{\pi}{2} \right)}{2} \quad (29)$$

Adoptou-se o coeficiente de rugosidade $K=80$ para traduzir o polimento dos agregados (microrugosidade).

Para a fixação de ε_1 tomaram-se como base os valores dos mesmos autores referidos no caso 1, o que permitiu fazer $\varepsilon_1 = 4,5\text{mm}$

A expressão adquirirá então a forma seguinte, com a mesma simbologia e unidades:

$$h = \left[\frac{l \times ip}{80 \times \left(\frac{2}{\pi} \right)^{2/3} \times p^{1/2}} \right]^{0.6} - 0,00096 \quad (30)$$

Caso 3 - Caso de macrorugosidade baixa e microrugosidade elevadas

Betão betuminoso rugoso

O modelo teórico foi o mesmo que no 1º caso, retomando-se o valor de $k = 60$ para o coeficiente de rugosidade.

Tomou-se para ε_1 o valor de 2,4mm e admitiu-se $\alpha = 100^\circ$ para transmitir uma menor angulosidade para os inertes em relação ao que sucedia para o revestimento superficial betuminoso.

A altura da água acima da crista das asperezas será:

$$h = \left[\frac{l \times ip}{60 \times (\sin 50^\circ)^{2/3} \times p^{1/2}} \right]^{0.6} - \frac{0,0024}{2} \quad (31)$$

Caso 4 - Caso de macrorugosidade e microrugosidade baixas*Betão betuminoso polido*

Neste caso o valor do raio hidráulico é igual à altura de água acima do topo das asperezas. Tomou-se para ε_1 o valor simbólico de 0,2mm.

Virá então:

$$h = \left[\frac{l \times ip}{8 \times p^{\frac{1}{2}}} \right]^{0.6} - \frac{0,0002}{2} \quad (32)$$

2.3.3.4. A rugosidade da camada de desgaste do pavimento

A principal maneira de se caracterizar a superfície de um pavimento é através da avaliação da textura. Entende-se por textura da superfície de um pavimento, de forma mais abrangente:

“o conjunto de características associadas à capacidade do pavimento em atender ao tráfego dos veículos que demandam sua utilização de forma segura, suave, confortável e económica”

Conceitualmente são conhecidas quatro escalas de textura: a microtextura, a macrotextura, a megatextura, e finalmente a irregularidade (roughness).

A microtextura é caracterizada pelo grau de rugosidade, ou aspereza individual da superfície das partículas do agregado que compõem a mistura betuminosa ou de betão de cimento Portland da camada de revestimento. A microtextura não é visível a olho nu, mas pode ser percebida por meio de tacto, identificando-se superfícies lisas ou ásperas. Formalmente a microtextura é definida como:

“o conjunto de desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características de comprimento de onda e amplitude menores que 0.5mm” [ASTM E 867].

“A natureza petrográfica e química dos agregados também influenciam a microtextura e a sua resistência ao polimento, que é provocado pelo contacto com os pneus. Por exemplo, os calcários são conhecidos pela sua tendência a resistir pouco à acção do polimento. Por outro lado, granitos e quartzitos geralmente são rochas duras, que conservam angularidade, os cantos vivos e a microtextura, resistindo bem à acção do tráfego.” (Vieth, 1986)

A macrotextura é caracterizada pelo tamanho do agregado, pela faixa granulométrica (quantidades relativas das diversas dimensões de agregados), pela configuração geométrica individual do agregado e pelos vazios existentes na mistura. Um pavimento que tem como característica alta macrotextura possui, na sua mistura, agregado graúdo e anguloso, que frequentemente se evidencia acima da linha média da superfície, originando grande volume de vazios entre as partículas mais próximas. Formalmente, a macrotextura é definida como:

“o conjunto de desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características de comprimento de onda e amplitude que variam de 0.5mm até uma dimensão que não afecte a interacção pneu-pavimento” [ASTM E 867].

Alguns autores ponderam a macrotextura na faixa de comprimento de onda de 0.5mm a 50mm e amplitude 0.1 a 20mm (classificação adoptada pela ISO/CD1373, conforme Cairney P e Styles E em 2005).

A figura 2.21 ilustra os conceitos de micro e macrotexturas.

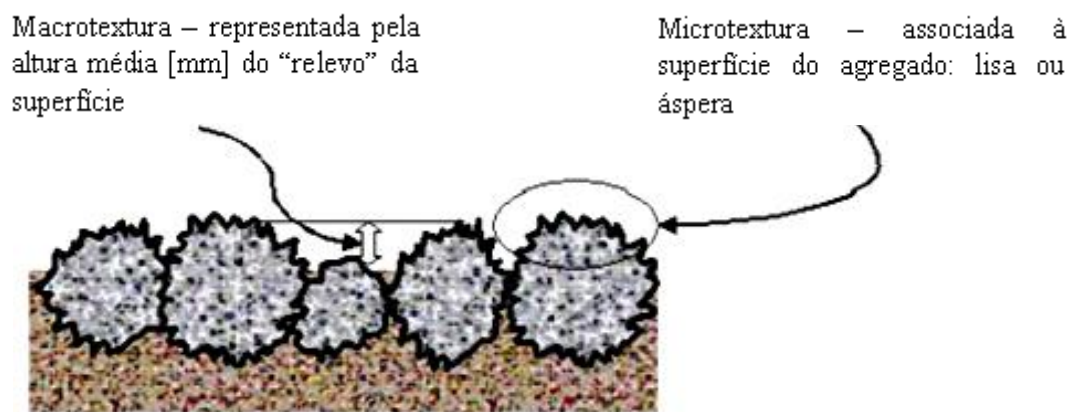


Fig.2.21 – Ilustração dos conceitos de micro e macrotextura. Adaptado de Merighi *et al* (2006)

A megatextura por sua vez, está associada aos desvios da superfície do pavimento decorrentes de factores como: formação de rodeira, buracos, remendos, perda de agregado na superfície e também pelas juntas e fissuras de maiores dimensões. Situa-se na faixa de 50 a 500mm de comprimento de onda e de 0.1 a 500mm de amplitude. A megatextura afecta em maior grau o nível de ruído e a resistência ao movimento provocada pelo atrito entre o pneu e o pavimento.

Finalmente, a irregularidade (roughness) refere-se aos desvios de dimensão superiores á megatextura e afecta além da resistência ao movimento, a dinâmica do veículo, a qualidade do movimento (associada ao conforto) e o custo operacional dos veículos. Formalmente a irregularidade é definida como:

“o desvio da superfície do pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana com dimensões características que afectam a dinâmica do veiculo e a qualidade do rolamento” [ASTM E 867].

A irregularidade fornece uma boa medida da condição geral do pavimento e é usualmente expressa em IRI – Índice Internacional de Irregularidade (International Roughness Index).

2.3.4. EFEITOS DOS TIPOS DE TEXTURA

Essas características da textura constituem as qualidades da superfície de uma pista que, em última análise, determinam as interacções entre pneu e pavimento e, consequentemente, influenciam os variados aspectos que contribuem para que o transporte seja realizado de forma segura, suave, confortável e económica.

O quadros 2.1 e a figura 2.22 mostram os efeitos dos tipos de textura e a sua influência nos veículos, nos ocupantes e no meio ambiente.

Quadro 2.1 – Influência da textura em diversos aspectos. Adaptado de Noyce, D.A *et al* (2005)

Efeitos no veículo, Ocupantes ou Meio Ambiente	Características da Superfície	Influência
Atrito	Microtextura	Muito Alta
	Macrotextura	Alta
	Megatextura	Moderada
Resistência ao Movimento	Macrotextura	Alta
Consumo de Combustível	Megatextura	Muito Alta
Poluição do Ar	Irregularidade	Alta
Desgaste do Pneu	Microtextura	Muito Alta
	Macrotextura	Moderada
Ruído externo	Macrotextura	Muito Alta
	Megatextura	Muito Alta
Drenagem da Superfície	Macrotextura	Alta
Esguicho e Pulverização	Macrotextura	Alta
Reflexão (luz do farol)	Microtextura	Pouco conhecida
	Macrotextura	Alta
Ruído interior	Macrotextura	Alta
	Megatextura	Muito Alta
	Irregularidade	Alta

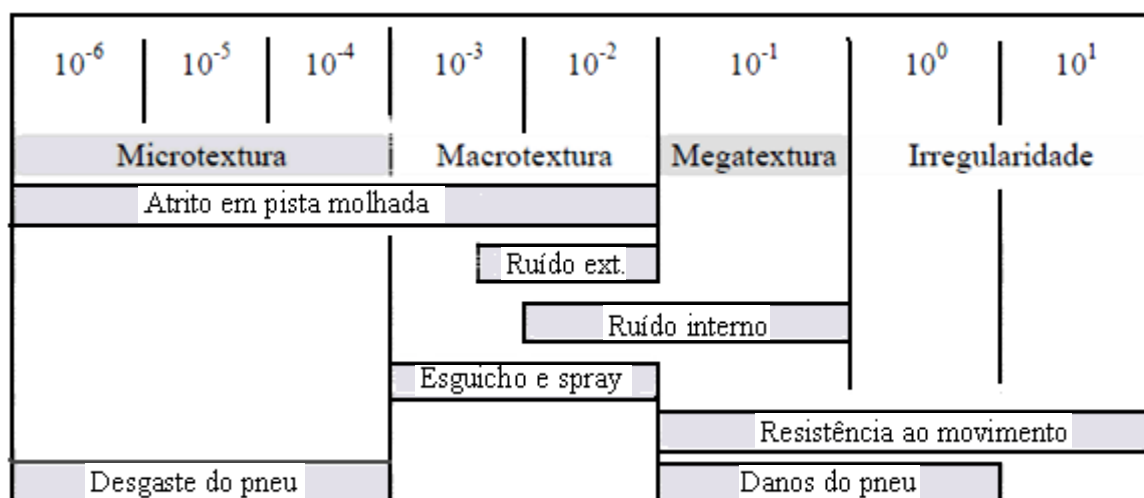


Fig.2.22 – Influência do comprimento de onda da textura [m] nas características da superfície do pavimento – Adaptado do proposto no 18º Word Road Congress por Noyce (2005)

2.3.5. MICROTTEXTURA, MACROTTEXTURA E SUA INFLUÊNCIA

2.3.5.1. Generalidades

No contexto deste trabalho, são abordados apenas os aspectos relativos à micro e macrotextura, uma vez que o foco da pesquisa é a questão da aderência pneu - pavimento.

Num pavimento com microtextura lisa, em condição seca, ocorre contacto íntimo entre as superfícies, permitindo grande número de ligações moleculares e, em consequência, o atrito por adesão tem grande participação nas perdas de energia por atrito. Por outro lado, quando o pavimento está molhado, a película de água que cobre a área de contacto e separa as superfícies reduz significativamente o efeito do atrito por adesão. A microtextura lisa favorece a ocorrência da hidroplanagem viscosa ou a área de actuação da hidroplanagem viscosa no caso da hidroplanagem combinada.

Um pavimento seco com microtextura áspera causa perdas por adesão ligeiramente menores que aquelas que se verificam num pavimento seco com microtextura lisa. Nesse caso, a área de contacto real na interface de contacto é menor, resultando em um menor número de ligações moleculares. Por sua vez, as perdas por adesão de um pavimento desse tipo são menos influenciadas pela presença de água, porque a superfície com microtextura áspera, mesmo molhada, ainda permite o contacto seco em grande parte da área de contacto, devido à agudeza das asperezas que rompem a película de água.

No que se refere à macrotextura, verifica-se que uma superfície seca com macrotextura fechada causa pequenas deformações na zona de rodagem, o que gera pequenas perdas por histerese e, em consequência, o atrito em razão da histerese é relativamente menor. Neste caso o volume activo da zona de rodagem é pequeno. Já na situação de um pavimento seco com macrotextura aberta, as perdas por histerese são grandes, devido à maior amplitude das deformações na zona de rodagem, que proporcionam grandes perdas por histerese. A contaminação por água até um certo grau não influencia de forma significativa as perdas por histerese, pois estas são basicamente resultantes da geometria da superfície e das propriedades visco-elásticas da borracha dos pneus.

A macrotextura, além disso, exerce grande influência no fenómeno da hidroplanagem dinâmica. O valor da espessura critica da lâmina de água, necessária para a ocorrência desse fenómeno, depende directamente da macrotextura, sendo maior nas estruturas abertas do que nas fechadas. Isso ocorre porque as estruturas abertas permitem a formação de canais entre a zona de rodagem e o pavimento, facilitando a drenagem da água para fora da área de contacto.

É possível, como será visto adiante, prevenir a ocorrência da hidroplanagem dinâmica em chuvas de intensidade razoável, se o pavimento for dotado de uma macrotextura suficientemente aberta.

A combinação dos conceitos de micro e macrotextura, juntamente com a possibilidade da superfície do pavimento estar seca ou molhada, resultam em 8 alternativas de condição de superfícies de pavimento, com significativa relevância no problema da aderência pneu – pavimento.

Para melhor entendimento dos termos a seguir mencionados, seguir-se-á uma breve explicação de alguns conceitos.

Segundo Andersen e Wambold em 1999, o atrito resultante do deslizamento real deve ser entendido como aquele que se produz devido ao movimento relativo entre a zona de rodagem do pneu e a superfície do pavimento, sendo consequência de três fenómenos:

- Adesão: na interface das duas superfícies surgem forças adesivas entre as moléculas os dois materiais, cuja magnitude depende do tempo de contacto e, portanto, da velocidade de deslizamento, além da composição da borracha do pneu e da microtextura da superfície. Esta sofre influência se for levemente separada por algum contaminante.

- Histerese: está relacionada com a macrotextura da superfície, pois é consequência da deformação que ocorre na borracha do pneu, quando a zona de rodagem desliza sobre as irregularidades do pavimento. A sua magnitude aumenta com a velocidade de deslizamento, e o seu valor máximo ocorre para maiores velocidades quando a temperatura aumenta; entretanto não são influenciadas quando as superfícies de contacto são levemente separadas por algum contaminante
- Desgaste: consequência do “arrancamento” de partículas do pneu na superfície de contacto com o pavimento.

A figura 2.23 apresenta esquematicamente os mecanismos de atrito referentes á adesão, à histerese e ao desgaste.

A figura 2.24 mostra a participação de cada tipo de atrito, no esforço de frenagem, para três diferentes tipos de superfícies de pavimento, interagindo com o mesmo pneu.

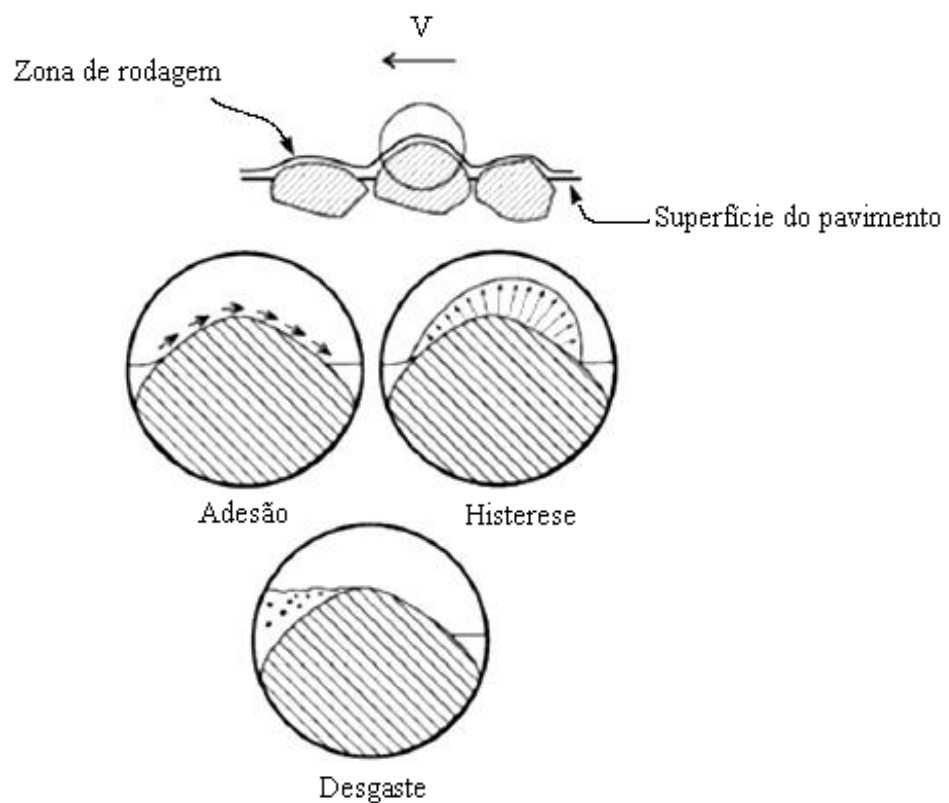


Fig.2.23 – Componentes do atrito quando um pneu desliza sobre um pavimento. Adaptado de Haney (2004)

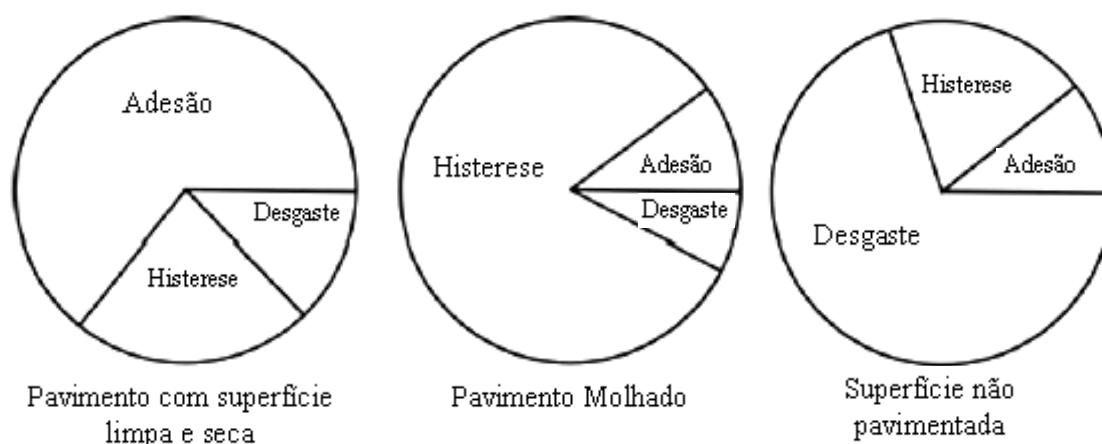


Fig.2.24 – Participação da adesão, histerese e desgaste no atrito de deslizamento. Adaptado de Andersen (1999)

Silva e Rodrigues Filho apresentaram em 1981 estudos relativos às diferentes combinações com relevância no problema da aderência pneu – pavimento.

2.3.5.2. Superfícies com Macrotextura Fechada e Microtextura lisa

Um pavimento com macrotextura fechada e microtextura lisa, quando seca, proporciona valores de coeficiente de atrito na faixa de 0.7 a 1.1, dependendo da composição da borracha e da pressão do pneu. Nesse tipo de piso, predominam as perdas por adesão.

O atrito disponível sobre um piso limpo e seco, com esse tipo de superfície, é praticamente independente da velocidade de deslocamento do pneumático.

Um pavimento com este tipo de estrutura, quando molhado, proporciona coeficientes de atrito reduzidos, mesmo em velocidades baixas, devido ao fenómeno de hidroplanagem viscosa. O pneu não consegue expulsar totalmente a água da área de contacto no intervalo de tempo de passagem da roda. Uma fina película de água interpõe-se entre a zona de rodagem e o pavimento, praticamente eliminando as perdas de energia por adesão. Como o processo de remoção da água depende do tempo de contacto, o coeficiente de atrito decresce com o aumento da velocidade.

Se o pavimento com essa textura estiver completamente inundado (entende-se por inundado quando mais de 25% da sua superfície, em áreas isoladas ou não, dentro do comprimento e largura em uso se apresenta coberto com fluido contaminante), na medida em que a velocidade aumenta a hidroplanagem viscosa é gradualmente substituída pela hidroplanagem dinâmica, dentro do mecanismo da hidroplanagem combinada. A macrotextura fechada faz com que a profundidade crítica de água, necessária para a ocorrência da hidroplanagem dinâmica completa, seja relativamente pequena. Nesse tipo de piso, a utilização de revestimentos drenantes é muito importante para prevenir a hidroplanagem dinâmica. A figura 2.25 mostra o modelo deste tipo de superfície.

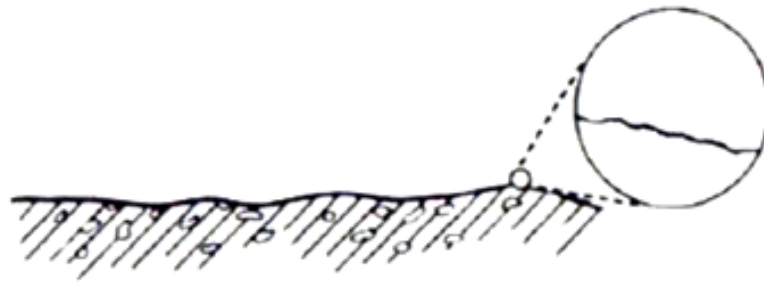


Fig.2.25 – Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura lisa. ESDU (1971)

A figura 2.26 ilustra a variação do coeficiente de atrito com a velocidade, aquando da frenagem sobre um pavimento com microtextura lisa e macrotextura fechada, em condição seca e inundada.

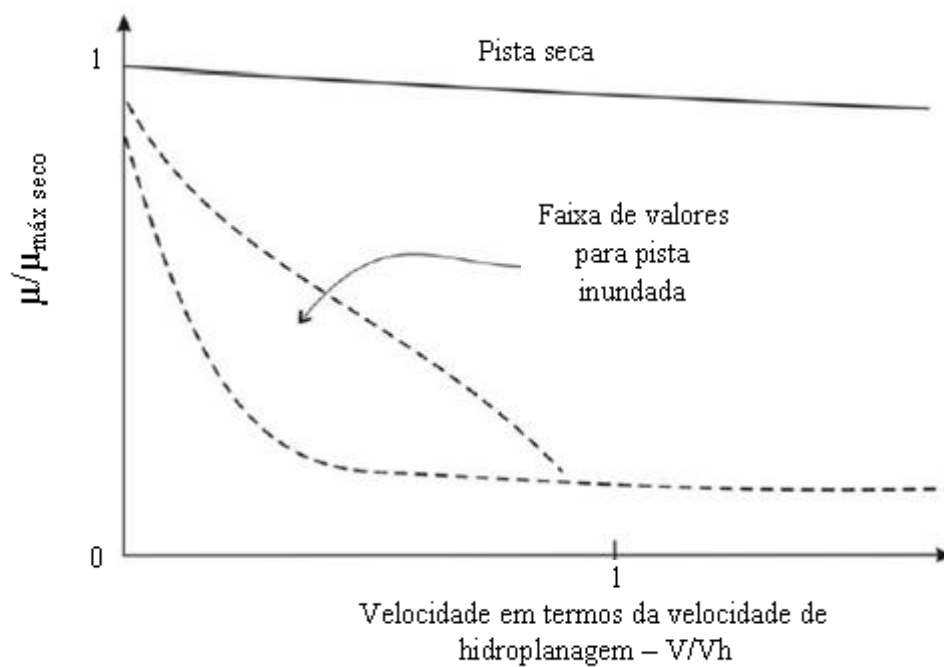


Fig.2.26 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura fechada, microtextura lisa. Adaptada de ICAO (1983)

2.3.5.3. Superfícies com Macrotextura Fechada e Microtextura Áspera

Um pavimento seco, com macrotextura fechada e microtextura áspera, proporciona valores de atrito levemente inferiores àqueles proporcionados por um pavimento de microtextura lisa, porque há diminuição da área real de contacto e menor adesão.

Na prática, a mencionada redução é pouco importante e é inteiramente compensada pelo incremento que essa microtextura proporciona ao atrito do pavimento, quando este está molhado. As asperezas perfuram e atravessam a fina película de água em milhares de pontos, tornando possíveis as perdas por adesão nos pontos de contacto teoricamente secos. A microtextura áspera não pode prevenir a ocorrência da hidroplanagem dinâmica quando o piso está inundado, nem o evento da hidroplanagem por desvulcanização, se as rodas deslizarem sem rodar, mas pode evitar a ocorrência da hidroplanagem viscosa.

A figura 2.27 mostra o modelo desse tipo de superfície

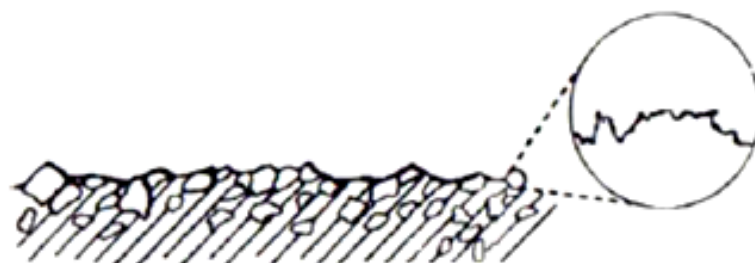


Fig.2.27 – Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura áspera. ESDU (1971)

A figura 2.28 mostra a variação do coeficiente de atrito com a velocidade, aquando da frenagem sobre um pavimento de macrotextura fechada e microtextura áspera, nas condições seca e inundada.

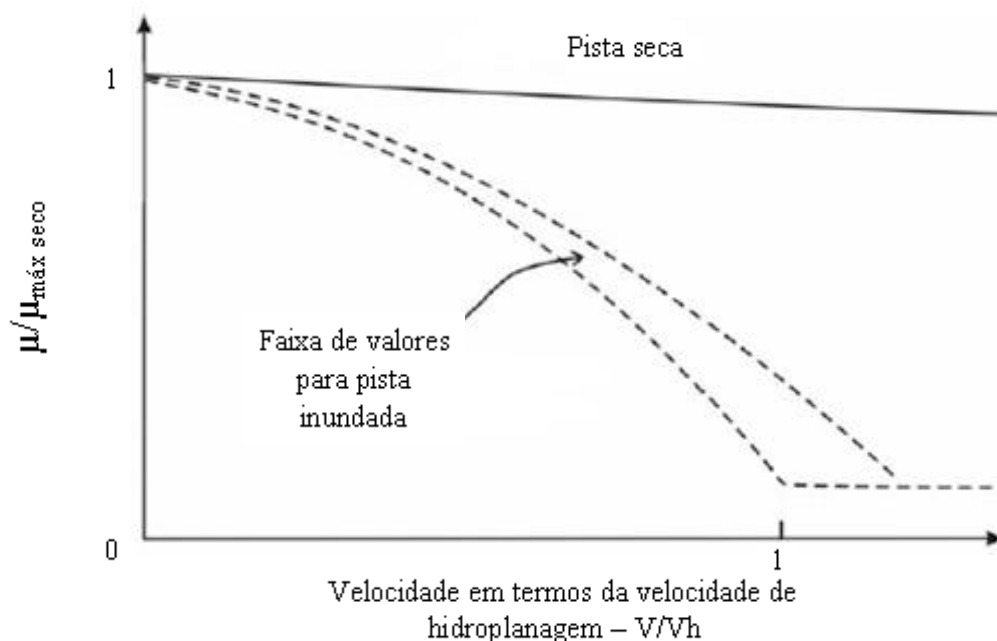


Fig.2.28 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura fechada, microtextura áspera. Adaptada de ICAO (1983)

2.3.5.4. Superfícies com Macrotextura Aberta e Microtextura Lisa

Um pavimento seco com macrotextura aberta e microtextura lisa proporciona coeficientes de atrito similares aos oferecidos pelo piso de textura fechada e lisa. Se a macrotextura for muito aberta os valores serão levemente inferiores, pois as perdas por adesão predominam. As perdas por histerese devidas á macrotextura podem alcançar uma participação na ordem de 25% do atrito.

A hidroplanagem viscosa pode ocorrer uma vez que a sua microtextura é lisa, entretanto as velocidades em que tal fenómeno pode acontecer não são tão baixas como no caso do pavimento de textura fechada e lisa.

A figura 2.29 mostra o modelo desse tipo de superfície.

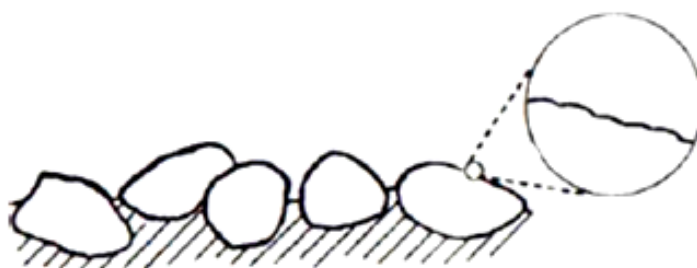


Fig.2.29 – Modelo de superfície com macrotextura aberta e microtextura lisa. ESDU (1971)

Quando o piso está inundado, as características do fluxo de água na área de contacto diferem consideravelmente das características do fluxo quando a macrotextura é fechada. Grande parte da água escoia pelos canais que se formam entre a zona de rodagem e a pista. Como consequência, a profundidade da lâmina de água necessária para a ocorrência da hidroplanagem dinâmica completa é maior. Essa profundidade aumenta com a macrotextura. Para uma certa intensidade de chuva é possível determinar, uma macrotextura que elimine a possibilidade de hidroplanagem dinâmica.

A figura 2.30 mostra o comportamento do atrito para pavimentos de textura aberta e lisa nas condições seca e inundada.

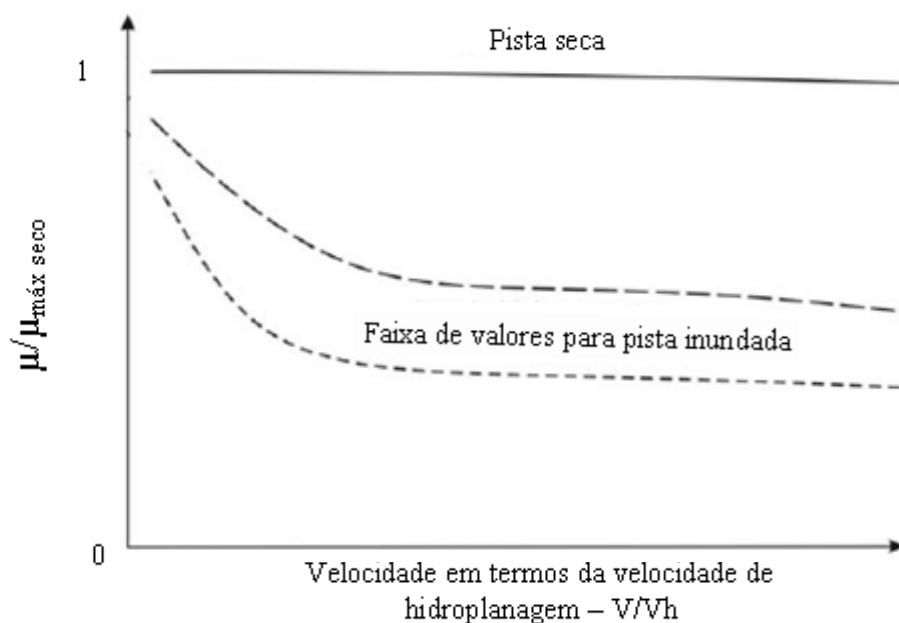


Fig.2.30 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura aberta, microtextura lisa.
Adaptada de ICAO (1983)

2.3.5.5. Superfícies com Macrotextura Aberta e Microtextura Áspera

Um pavimento seco com macrotextura aberta e microtextura áspera proporciona coeficientes de atrito levemente inferiores àqueles possíveis de se obter com uma microtextura lisa. As perdas por adesão predominam, mas a contribuição das perdas por histerese em razão da macrotextura são superiores a 25% do valor do coeficiente de atrito.

A microtextura áspera diminui o potencial de ocorrência de hidroplanagem viscosa quando o piso está molhado e a macrotextura aberta dificulta a ocorrência da hidroplanagem dinâmica, na medida em que a profundidade crítica da lâmina de água cresce consideravelmente.

Um pavimento com essas características é o que melhor atende aos aspectos de aderência entre pneu e pavimento.

A figura 2.31 mostra o modelo dessa superfície.

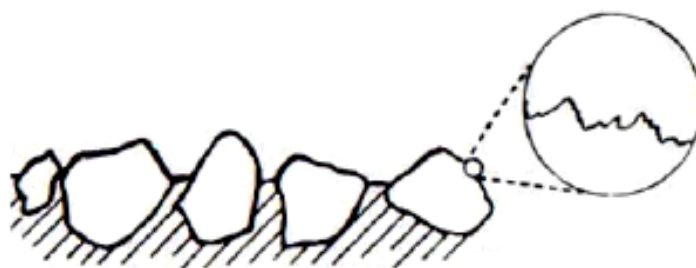


Fig.2.31 – Modelo de superfície com macrotextura aberta e microtextura áspera. ESDU (1971)

A figura 2.32 ilustra a variação o coeficiente de atrito, com a velocidade para esse tipo de pavimento. A curva em linha cheia, para a pista inundada, ilustra o caso em que a macrotextura é suficientemente aberta para prevenir a hidroplanagem dinâmica.

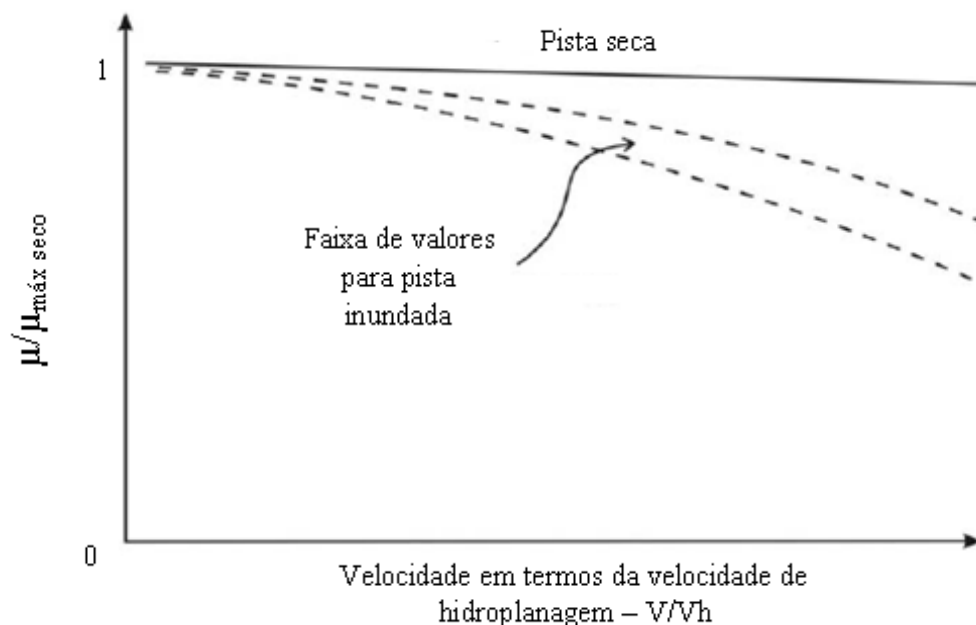


Fig.2.32 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura aberta, microtextura áspera. Adaptada de ICAO (1983)

2.3.5.6. Avaliação da Microtextura e Macrotextura

A microtextura pode ser avaliada por um equipamento simples como o pêndulo britânico (ASTM E 303). Esse equipamento é munido de um braço pendular cuja extremidade tem uma sapata recoberta de borracha para ser atritada contra a superfície do pavimento humedecida.



Após o início do ensaio, o pêndulo é solto livremente em direcção ao pavimento



Após o atrito sobre a superfície do pavimento o pêndulo empurra a haste que marca o valor de VRD

Fig.2.33 – Operação do pêndulo britânico para a determinação do valor de resistência à derrapagem. [6]

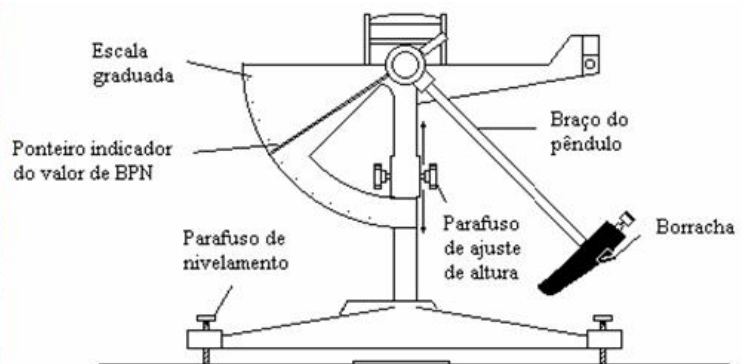


Fig.2.34 – Pêndulo Britânico (Estradas de Portugal) e esquema do Pêndulo. Santos (2007b)

O valor da microtextura pode e deve ser determinado através do ensaio do coeficiente de polimento acelerado dos inertes inicialmente utilizados. Este ensaio permite estimar um valor aproximado da microtextura.

A figura 2.35 apresenta o equipamento usado no ensaio de polimento acelerado.



Fig.2.33 – Equipamento para ensaio de polimento acelerado.

A macrotextura pode ser determinada de várias formas, sendo a mais comum pelo ensaio simples de altura média da mancha de areia (ASTM E 965).

Os materiais envolvidos nesse teste são de baixo custo.

A areia deve ser uniforme, arredondada, passante no peneiro 0,177mm e retida no peneiro 0,250mm, com um volume de 25.000mm³. A areia deve ser espalhada sobre a superfície do pavimento com auxílio de uma base de um pistão circular, que é movimentada em círculos, paralelamente à superfície do pavimento, de modo a distribuí-la de forma homogênea, perfazendo um círculo de areia.



Fig.2.36 – Sequência da Técnica do ensaio da Mancha de Areia normalizada. [7]

O espalhamento cessa quando aparecem algumas pontas dos agregados. Mede-se na sequência a diâmetro do círculo de areia com auxílio a uma régua em três direcções distintas e faz-se a média das três determinações.

Tem-se recomendado a macrotextura dos pavimentos na faixa entre 0.6 e 1.2mm de altura média da mancha de areia.

Abaixo de 0.6mm a macrotextura passa a ter tendência de ser fechada e aumenta o risco de aquaplanagem.

Acima de 1.2mm a textura é muito aberta, causando desgaste excessivo nos pneus, maior consumo de combustível e tendência a maior ruído ao rolamento.

A macrotextura é uma das características mais importantes e que afectam a aderência, principalmente para velocidades de deslocamento acima de 50km/h.

Segundo dados recolhidos por Francisco Salpico, engenheiro membro do Observatório de Segurança das Estradas e Cidades (OSEC), a altura de areia de 0.6mm é a que se verifica nas vias rápidas e auto-estradas em Portugal, sendo estes dados confirmados pela Estradas de Portugal como este sendo o valor mínimo utilizado para pavimentos novos e em obras de beneficiação.

O risco de aquaplaning é mais elevado nas zonas de proximidade das curvas, onde o comprimento das linhas de água a escorrer sobre o pavimento é maior. O comprimento máximo para o especialista do OSEC não pode ser superior a 6m, tendo em conta a rugosidade corrente dos pavimentos das vias rápidas.

Defende Francisco Salpico que a solução para melhorar a segurança das estradas está no aumento da macrorugosidade.

3

IMPACTOS ESTRUTURAIS

3.1. INTRODUÇÃO

A avaliação do estado estrutural de um pavimento está relacionada com a determinação do seu nível de desempenho mecânico, ou seja a capacidade de suportar cargas para as quais foi projectado, tendo em conta factores como o tráfego e as condições climáticas.

Frequentemente verifica-se que os pavimentos apresentam uma degradação prematura da sua qualidade funcional e estrutural.

Logo após a construção, os pavimentos rodoviários começam a ser submetidos a acções variadas, que contribuem de forma continuada para a sua degradação, ou seja, para a redução progressiva da sua qualidade inicial. Assim, mesmo antes de sofrer a acção do tráfego, as acções dos agentes atmosféricos provocam no pavimento solicitações mais ou menos severas de acordo com o tipo de pavimento e a sua localização.

É preciso ter em conta, quando se pretende compreender os mecanismos de degradação, o modo de funcionamento de um pavimento e também o modo de quantificar e qualificar as acções externas, as propriedades dos materiais, assim como as solicitações e estados de deformação desenvolvidos no conjunto da estrutura “pavimento-fundação”.

Na figura 4.1 temos uma representação esquemática de um pavimento rodoviário, com a indicação das principais acções e solicitações desenvolvidas.

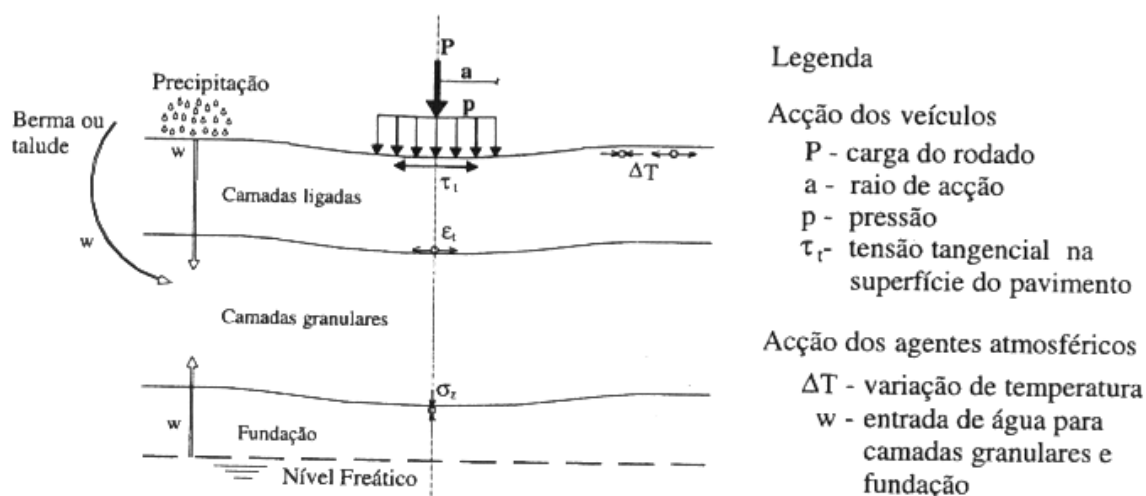


Fig. 3.1- Pavimento rodoviário: acções e solicitações. [9]

Sabe-se que um pavimento é uma estrutura multi-estratificada, constituída por camadas de espessura finita, apoiada numa fundação constituída pelo terreno natural. Relativamente ao tipo de materiais constituintes pode considerar-se que o pavimento é fundado por duas partes: na parte superior por camadas com materiais estabilizados com ligantes, e normalmente, na parte inferior por camadas com materiais granulares, estabilizados mecanicamente.

A diferença entre os dois tipos de materiais é que os primeiros têm a capacidade de resistência a esforços de tracção e os segundos a esforços de compressão. No que diz respeito às solicitações definem-se dois grupos: as resultantes da aplicação das cargas dos veículos e as resultantes da acção dos agentes climatéricos.

O modo de evolução das degradações, aparentes ou não, de um pavimento, regula-se pelo “princípio da cadeia de consequências”, onde uma degradação não evolui isoladamente no tempo, mas sim dá origem a novos tipos de degradações, as quais interferem com as características das primeiras. Forma-se assim uma actividade cíclica, onde as diferentes degradações interferem mutuamente. Deste modo, tem-se que o processo de degradação de um pavimento depende de dois grupos de factores: os factores passivos, característicos do pavimento construído (espessura das camadas, materiais utilizados, qualidade de construção), e os factores activos, principais responsáveis pela degradação, compreendendo as acções do tráfego e do clima.

No contexto deste trabalho é indispensável mencionar o efeito da presença da água. A acção da água tem como consequência directa uma diminuição do atrito interno dos materiais granulares, o que sob a acção das cargas, facilita um novo arranjo das partículas constituintes. A contribuição da água para as deformações geradas será função da sensibilidade à água por parte das camadas granulares e do solo de fundação.

A seguir caracterizam-se as diferentes famílias de degradações para os três tipos de pavimentos, pavimentos flexíveis, rígidos e semi-rígidos, analisando as principais causas do seu aparecimento e da sua evolução.

3.2. PATOLOGIAS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

3.2.1. FAMÍLIAS E TIPOS DE DEGRADAÇÕES DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Ao longo da vida útil dos pavimentos flexíveis é notório o aparecimento de uma vasta diversidade de degradações as quais contribuem para uma contínua redução da qualidade do pavimento.

As degradações mais relevantes compreendem o aparecimento de deformações permanentes e o desenvolvimento de fendilhamento nas camadas betuminosas.

As principais causas das degradações dos pavimentos flexíveis estão relacionadas com factores como a intensidade de tráfego, as acções climatéricas, as deficiências dos materiais, deficiências de projecto ou da qualidade de construção.

As patologias referentes a este tipo de pavimento podem ser agrupadas em quatro grandes famílias: *deformações, fendilhamento, desagregação e polimento da camada de desgaste, e movimentação de materiais.*

De acordo com o “Catálogo de Degradações” elaborado pelas Estradas de Portugal [EP-IEP-JAE] as reparações observáveis na camada de desgaste também são consideradas patologias, por melhor que estejam executadas, já que criam descontinuidades e tornam-se locais susceptíveis ao surgimento de novas patologias.

Quanto às quatro famílias de degradações referidas, devem distinguir-se dois grupos: aquelas que correspondem à evolução comum de um pavimento correctamente dimensionado e construído, e aquelas correspondentes a uma evolução anormal devido a deficiências de projecto e/ou construção.

No primeiro grupo devem incluir-se as degradações das famílias de deformações e fendilhamento, enquanto as outras duas famílias, arranque de materiais e movimento de materiais fazem parte do segundo grupo.

Em consonância com o catálogo de degradações, devem ainda distinguir-se alguns casos de fendilhamento, enquadrando uns no primeiro grupo de outros no segundo. No primeiro grupo deve incluir-se as fendas que resultam do processo normal de fadiga, abrangendo todos os estádios de evolução do fendilhamento, desde as isoladas à pele de crocodilo. No segundo grupo podem incluir-se as fendas longitudinais e transversais. Na verdade, este tipo de fendas resulta de um funcionamento anormal do pavimento devendo-se em geral a deficiências dos materiais de pavimentação ou do processo de construção.

Estas famílias de degradações têm uma localização no pavimento, e uma sequência e interacção mútua que pode ser esquematizada pelo gráfico da figura 4.2.

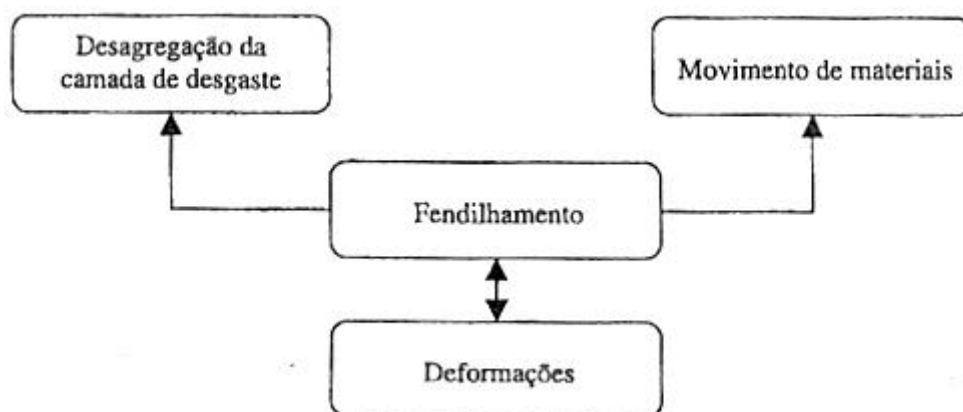


Fig. 3.2 – Sequência e interacção das degradações. Fernando Branco *et al* (2008)

O fendilhamento apenas ocorre nas camadas constituídas por misturas betuminosas.

O movimento dos materiais pode desenvolver-se apenas nas camadas betuminosas, caso da exsudação, ou abranger todas as camadas e o solo de fundação, quando se trata da subida de finos.

Quanto à interacção e sequência destas degradações, a interacção principal efectua-se entre as deformações e o fendilhamento, embora tenham ambas origens noutras causas. Assim, apesar de uma deformação excessiva poder contribuir para a evolução do fendilhamento, também um fendilhamento contribuirá definitivamente para o agravamento da deformação em geral.

Relativamente à família do movimento dos materiais, existe claramente uma interacção entre o fendilhamento e a subida dos finos (bombeamento) das camadas granulares e do solo de fundação.

A desagregação da camada de desgaste estará relacionada principalmente com a qualidade dos materiais e com a agressividade do tráfego, podendo também ser proveniente da evolução do fendilhamento.

As quatro famílias de degradações dos pavimentos flexíveis abarcam em si vários tipos de degradações como se constata no quadro 3.1. Posteriormente para cada família descrevem-se os diferentes tipos de degradações.

Quadro 3.1 – Famílias e Tipos de degradações. Adaptado de Pereira e Miranda (1999)

FAMÍLIAS DE DEGRADAÇÕES	TIPOS DE DEGRADAÇÕES
Deformações	Abatimento { Longitudinal { berma eixo Transversal
	Deformações localizadas
	Ondulação
	Rodeiras { Grande raio (camadas inferiores) Pequeno raio (camadas superiores)
Fendilhamento	Fendas { Fadiga Longitudinais { eixo berma Transversais Parabólicas
	Pele de crocodilo { Malha fina ($\leq 40\text{cm}$) Malha larga ($> 40\text{cm}$)
Desagregação da camada de desgaste	Desagregação
	Cabeça de gato
	Pelada
	Ninhos (covas)
Movimento de materiais	Exsudação
	Subida de finos

A observação constante de pavimentos em serviço, bem como a análise pormenorizada do comportamento de trechos experimentais, possibilita estabelecer relações “causa-efeito”, podendo traduzir-se sob a forma de matriz como a apresentada no quadro 3.2.

Neste quadro estabelece-se uma relação ponderada entre os diferentes tipos de degradações (efeitos) e os diversos agentes de degradação (causas), através de um determinado número de asteriscos (*). Quando maior o número de asteriscos mais forte é a relação “causa-efeito”. Esta classificação pretende apenas dar uma informação aproximada de cada tipo de relação. No entanto, aquando do estudo de determinada patologia, deve existir sempre observação “in situ” das condições envolventes.

Quadro 3.2 – Classificação das relações entre as degradações e os factores de degradação. Adaptado de Fernando Branco *et al* (2008)

DEGRADAÇÕES	FACTORES DE DEGRADAÇÃO									
	Condições de drenagem	Sub-dimensões da camada de desgaste	Sub-dimensões das camadas inferiores	Capacidade de suporte da fundação	Qualidade dos materiais	Deficiências de fabrico e execução	Ligação entre a camada de base e de desgaste	Agressividade do tráfego	Acções climáticas	Camadas estruturais de reduzida compacidade
Deformações	***	*	**	***	*	**		*	*	***
Rodeiras	***	*	**	***	**	*		**	**	***
Fendas	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Fendas parabólicas	*	**			**	**	***	***	***	**
Pele de crocodilo	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Pelada		***	*		**	**	***	***	**	**
Ninhos		**	*		***	***	**	**	**	***
Cabeça de gato					***	**		***	*	**
Desagregação superficial					***	***		**	***	**
Exsudação					***	**		***	***	

A seguir, para cada família de degradações, são caracterizados os diferentes tipos de degradações que podem ocorrer nos pavimentos flexíveis, procurando-se estabelecer a relação entre cada um e os factores activos (intensidade de tráfego e acções climáticas) e passivos de degradação (deficiências dos materiais e da qualidade de construção), com as fotos correspondentes ao Catálogo de Degradações (CD) de 1997 e outras coligidas.

4.2.2. DEFORMAÇÕES

A família das deformações pode ser subdividida nos seguintes tipos (quadro 3.1):

- Abatimento
- Ondulações
- Deformações localizadas
- Rodeiras

As deformações devem-se, na sua maioria, a factores de degradação como as condições de drenagem, a capacidade de suporte da fundação e a camadas estruturais de reduzida compacidade (quadro 3.2).

O abatimento é uma deformação com uma extensão significativa, podendo apresentar-se na direcção longitudinal (ao longo do pavimento) ou na direcção transversal. O abatimento longitudinal pode fixar-se junto à berma ou ao longo do eixo da faixa de rodagem.

Quando o abatimento se localiza junto da berma pode resultar de uma redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, proveniente da entrada de água através da berma ou da interface berma-pavimento.



Foto 3.3 – Abatimento longitudinal na berma [7]

O abatimento ao longo do eixo pode ocorrer quando exista um fendilhamento ao longo do eixo, resultando numa redução da capacidade de suporte por infiltração de água até às camadas inferiores granulares e ao solo de fundação, ou problemas de construção da camada de desgaste.



Foto 3.4 – Abatimento longitudinal no eixo [7]

O abatimento transversal tem uma localização resultante da ocorrência de situações patológicas das camadas inferiores, em particular no solo de fundação e camadas granulares.



Foto 3.5 – Abatimento transversal [7]

Uma deformação de outro tipo é a que se verifica numa pequena área do pavimento (deformação localizada), geralmente acompanhada de rotura do pavimento. Neste tipo de deformação existem alterações de nível no pavimento, formando depressões ou alteamentos, podendo surgir isoladamente em pontos distintos do pavimento; podem resultar da falta de capacidade do solo de fundação, contaminação localizada das camadas granulares ou capacidade deficiente em zonas pontuais do pavimento, em particular das camadas granulares.



Foto 3.6 – Deformação localizada [7]

A ondulação é uma deformação transversal que se repete com uma determinada frequência ao longo do pavimento. Pode ocorrer nas camadas de desgaste constituídas por revestimento superficial, devido a deficiências na distribuição do ligante, ou pode verificar-se nas camadas de betão betuminoso onde ocorra o arrastamento da mistura por excessiva deformação plástica, devido à acção do tráfego; também pode ter como causa a deformação da fundação.

Normalmente quando o pavimento é correctamente projectado e construído, com adequada conservação ao longo da sua vida útil, este tipo de deformação não deverá ocorrer.



Foto 3.7 – Ondulação [7]

As rodeiras são deformações transversais localizadas ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos, podendo ser de grande ou pequeno raio; podem ter como causas a compactação insuficiente das camadas em geral, a capacidade deficiente das camadas granulares e da fundação, com a ocorrência de deformações permanentes (rodeiras de grande raio) ou mesmo a presença de misturas betuminosas com reduzida resistência à deformação plástica (rodeiras de pequeno raio).



Foto 3.8 – Rodeiras [7]

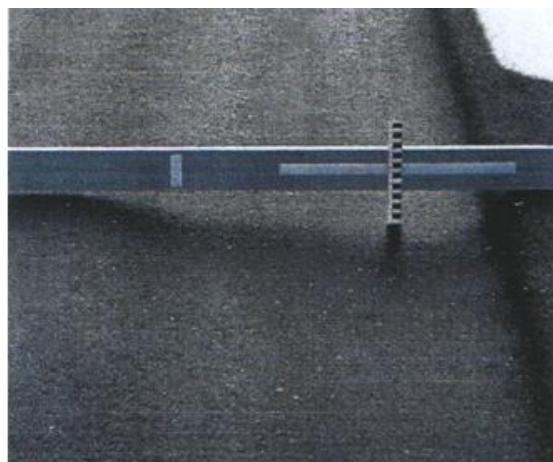


Foto 3.9 – Rodeira de classe 3 - CD

3.2.3. FENDILHAMENTO

Esta família de degradações é a mais frequente nos pavimentos flexíveis, resultando na maioria dos casos, da fadiga dos materiais das camadas betuminosas, devido à repetição dos esforços de tracção por flexão desta camada. Constitui assim, em geral, um dos primeiros sinais da redução da qualidade estrutural de um pavimento.

Os três principais tipos de mecanismos são os seguintes:

- Fendilhamento por fadiga – fendilhamento com origem na base das camadas betuminosas devido à repetida aplicação de esforços de tracção induzidos pela passagem das rodas dos veículos pesados;
- Reflexão de fendas – fendilhamento que resulta da propagação de fendas existentes em camadas subjacentes às camadas betuminosas, que se observa em estruturas de pavimentos resultantes do reforço de pavimentos flexíveis fendilhados;
- Fendilhamento com origem à superfície – fendilhamento que se tem vindo a observar com particular incidência nas estruturas de pavimentos destinados a tráfego relativamente elevado, que podem induzir estados de tensão na interface entre o pneu e o pavimento.

A qualidade dos materiais, a agressividade do tráfego e as condições climáticas, podem ser consideradas como principais factores de degradação.

O fendilhamento pode integrar um elevado número de tipos de degradações, quer sejam fendas isoladas ou ramificadas, classificadas quanto à sua localização e origem, quer sejam fendas formando uma malha (denominada de “pele de crocodilo”), resultante da evolução de outras fendas.

No primeiro grupo distinguem-se as fendas resultantes da fadiga do pavimento (fendas de fadiga), as fendas longitudinais, as fendas transversais e as parabólicas.

As fendas de fadiga são fendas irregulares localizadas na zona de passagem dos pneus dos veículos, geralmente iniciadas na direcção longitudinal, progredindo na direcção transversal e noutras direcções irregulares; podem ser isoladas ou ramificadas, consoante a menor ou maior fase de desenvolvimento respectivamente. As causas possíveis são a fadiga das camadas betuminosas, a falta de capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação ou a camada de superfície com qualidade deficiente dos materiais.



Foto 3.10 – Fendas de fadiga [7]



Foto 3.11 – Fendas de fadiga de classe 3 - CD

As fendas longitudinais são paralelas ao eixo da estrada, localizadas usualmente ao longo da zona de passagem dos veículos e em determinadas ocasiões junto ao eixo. As causas prováveis são a deficiência da junta longitudinal de construção, a drenagem deficiente, originando diferencial de capacidade de suporte junto à berma e/ou misturas betuminosas muito rígidas originando abertura de fendas por retracção.



Foto 3.12 – Fenda longitudinal [7]

As fendas transversais são sensivelmente perpendiculares ao eixo da estrada, isoladas ou com um espaçamento variável, abrangendo parte ou toda a largura da faixa de rodagem. Podem ser resultantes de uma deficiência da junta transversal de construção, da retracção térmica da camada de desgaste ou mesmo da capacidade de suporte diferencial da fundação.



Foto 3.13 – Fenda transversal [7]

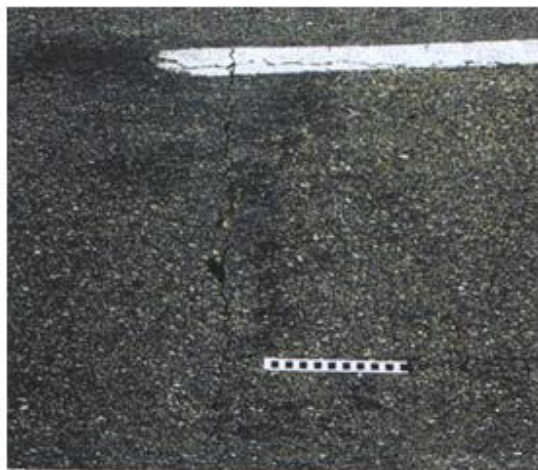


Foto 3.14 – Fenda transversal de classe 3 - CD

As fendas parabólicas aparecem na zona de passagem dos pneus, com o eixo da parábola orientado no sentido longitudinal. Geralmente resultam de problemas de estabilidade da camada de desgaste e da sua ligação às camadas betuminosas inferiores.

O mais importante grupo de fendilhamento é constituído pela pele de crocodilo, fendas que formam entre si uma malha de dimensão variável, localizada inicialmente na zona de passagem das rodas dos

veículos abrangendo progressivamente toda a largura da via de circulação. Resulta da evolução das fendas ramificadas. As causas podem ser as mesmas que foram anteriormente descritas para as fendas de fadiga.



Foto 3.15 – Pele de crocodilo [7]

A pele de crocodilo, tendo em conta a fase de desenvolvimento em que se encontra, quanto à abertura da malha, pode classificar-se em malha estreita (lado da malha $\leq 40\text{cm}$) ou em malha larga (lado da malha $\geq 40\text{cm}$). Quanto à abertura dos bordos das fendas, classifica-se em aberta ou fechada.

A foto 3.16 representa a pele de crocodilo de malha larga e fenda aberta, correspondendo a um pavimento em avançado estado de degradação no qual, além da perda de capacidade das camadas betuminosas se verificará uma redução da qualidade das camadas granulares.



Foto 3.16 – Pele de crocodilo de malha larga - CD

A foto 3.17 apresenta um pavimento com pele de crocodilo de malha estreita e fendas abertas, no estado de ruína estrutural.



Foto 3.17 – Pele de crocodilo de malha estreita - CD

A pele de crocodilo corresponde então a uma fase de evolução rápida de degradação do pavimento. Esta evolução será acelerada devido à entrada de água exterior no pavimento, através das fendas existentes, promovendo uma redução da capacidade de suporte do solo de fundação e do desempenho das camadas granulares. Esta redução conduz a um maior esforço de tracção por flexão das camadas betuminosas, acelerando o processo de degradação.

Como forma de precaução poderia fazer-se uma conservação preventiva com uma simples camada de impermeabilização. Esta camada evitaria a entrada de água no pavimento, reduzindo a velocidade de degradação deste. A pele de crocodilo evolui de malha larga para estreita, enquanto as fendas evoluem de fechadas para abertas, podendo na fase final dar origem a ninhos e, em certos casos, à formação de peladas.

3.2.4. DESAGREGAÇÃO DA CAMADA DE DESGASTE

A desagregação da camada de desgaste traduz-se na perda de qualidade superficial da camada de desgaste, devido à evolução da própria camada, cuja degradação resulta fundamentalmente da falta de estabilidade da ligação entre os materiais constituintes da mistura.

Quando se verifica, na superfície da camada de desgaste, uma perda da componente mais fina da mistura betuminosa, os agregados grossos ficam mais salientes, denominando-se esta degradação por “cabeça de gato”, devido ao aumento da macrotextura da superfície. Os efeitos negativos desta degradação são ao nível do ruído e do desgaste dos pneus, embora a capacidade drenante da superfície do pavimento seja favorecida.

Uma das degradações mais relevantes desta família é a desagregação superficial, resultante do arranque de uma das fracções do agregado, geralmente a mais grossa ou perda do mastique (finos, filer e ligante betuminoso), em parte resultante da evolução da degradação anterior.



Foto 3.18 – Desagregação superficial [7]

Outra degradação desta família designa-se por “pelada”, correspondendo ao desprendimento em forma de placa, da camada de desgaste relativamente à camada inferior. A pelada pode ter causas idênticas às fendas parabólicas, sendo diversas vezes um etapa subsequente da evolução dessas fendas. No entanto, as causas mais influentes podem ser a espessura reduzida da camada de desgaste, uma deficiente ligação entre esta e a camada betuminosa seguinte ou até a falta de estabilidade da camada de desgaste.



Foto 3.19 – Pelada [7]



Foto 3.20 – Pelada de classe 3 - CD

A evolução natural da pele de crocodilo conduz à desagregação dos bordos das fendas, dando origem ao início da formação de ninhos ou covas. Os ninhos (covas) são cavidades de forma arredondada localizados na camada de desgaste, podendo progredir para as camadas inferiores. As causas possíveis são a evolução de outras degradações, em particular do fendilhamento, a deficiente qualidade dos materiais da camada de desgaste e/ou uma zona localizada com deficiente capacidade de suporte. Este tipo de degradação pode também ter início numa desagregação localizada da camada de desgaste que evolui através da espessura.

A desagregação da camada de desgaste resulta da deficiente ligação entre os diversos componentes de uma mistura betuminosa, ou da falta de estabilidade dessa ligação. Além das deficiências na qualidade dos materiais, a desagregação pode ter como causas directas, as deficiências na execução da camada de desgaste, a segregação dos inertes em central durante o transporte ou na sua colocação, um betume deficiente, a presença de água (insuficiente secagem dos inertes) além das condições de temperatura desfavoráveis na fase de execução (temperaturas bastante reduzidas) que afectam a compacidade da camada.

Os ninhos ou covas são as últimas etapas no processo de degradação de um pavimento, com efeitos severos sobre os veículos, sofrendo ao mesmo tempo a acção acrescida destes, contribuindo para a evolução acelerada da degradação do pavimento.

Esta degradação pode ainda resultar de uma zona localizada com deficiente capacidade de suporte (drenagem insuficiente), ou um defeito localizado na camada de desgaste ou na camada de base (má qualidade de fabrico ou colocação).



Foto 3.21 – Ninho (cova) [7]

A última degradação desta família é o polimento dos agregados, que se traduz num desgaste por abrasão, geralmente da fracção grossa do agregado, conferindo à superfície do pavimento um aspecto polido e brilhante, como se pode observar na foto 3.22.



Foto 3.22 – Polimento dos agregados [7]

3.2.5. MOVIMENTO DE MATERIAIS

O movimento de materiais refere-se às patologias resultantes da movimentação dos materiais constituintes das camadas (betuminosas ou granulares), ou da fundação através das camadas do pavimento.

Um dos dois tipos de degradações desta família é a designada “exsudação”, resultado da alteração da camada de desgaste devido à migração para a superfície do ligante betuminoso na camada de desgaste, em particular na zona de passagem dos pneus dos veículos, conferindo-lhe um aspecto negro e brilhante. Pode resultar de um excesso de ligante com consequente envolvimento dos agregados grossos e redução da macrotextura, de contaminação por rega de colagem excessiva, por ligante de reduzida viscosidade e/ou mistura betuminosa de reduzida estabilidade submetida a tráfego intenso e temperaturas elevadas.



Foto 3.23 – Exsudação [10]



Foto 3.24 – Exsudação (pormenor) [7]

O outro tipo de degradação é a subida (ou bombeamento) de finos, que se traduz em manchas de cor esbranquiçada devidas à presença de finos, provenientes das camadas granulares e do solo de fundação, inicialmente junto às fendas e depois evoluindo para toda a superfície da camada de desgaste. As causas possíveis são a drenagem deficiente do pavimento, que promove a ascensão da água através do solo de fundação, das camadas granulares e das camadas betuminosas fendilhadas, arrastando os finos. Também pode ser devida à circulação da água infiltrada nas camadas granulares através das fendas e expulsa através destas devido à passagem dos veículos (compressão exercida sobre o pavimento).



Foto 3.25 – Subida de finos [7]

3.2.6. REPARAÇÕES

Além de todas as famílias de degradações mencionadas anteriormente, consideram-se as reparações como degradações a observar e classificar. Na realidade, uma reparação indicará frequentemente uma zona do pavimento que teve uma evolução anormal, e por outro, estas reparações aparecem com degradações associadas, particularmente na interface vertical com a camada existente ou com fendilhamento na superfície da reparação.

As causas possíveis são as diversas degradações prematuras que correspondem a uma evolução anormal do pavimento.

Uma reparação não é considerada degradação quando é bem executada e elimina a causa da anterior degradação. No entanto, quando não elimina a causa da degradação anterior, pode evoluir quer ao nível da interface com a camada inicial do pavimento existente, quer dentro da própria área da reparação.

Os exemplos das reparações são ilustrados nas fotos 3.26 e 3.27.



Foto 3.26 – Reparação de classe 1 - CD



Foto 3.27 – Reparação de classe 3 - CD

3.3. PATOLOGIAS DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

3.3.1. FAMÍLIAS E TIPOS DE DEGRADAÇÕES DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

As principais patologias dos pavimentos rígidos podem ser agrupadas em: *movimento dos materiais*, *deformações*, *fendilhamento das lajes*, *defeitos de superfície*, e à semelhança dos pavimentos flexíveis, *as reparações*.

3.3.2. MOVIMENTO DOS MATERIAIS

O movimento dos materiais é caracterizado essencialmente pelo bombeamento (pumping) de finos, ou seja, pela subida de finos, à passagem dos pneus dos veículos (principalmente veículos pesados), nas juntas ou fendas, ocasionando cavidades sob o betão de cimento, já que as juntas apesar de impermeabilizadas após a construção permitem gradualmente a passagem da água através delas, o que leva portanto à ascensão de finos.

O bombeamento de finos é um fenómeno que tem mais importância neste tipo de pavimento do que nos pavimentos flexíveis, uma vez que está na origem, muitas vezes, de fendilhamento e escalonamento.

Nos pavimentos flexíveis, como já foi referido anteriormente, este fenómeno está associado à existência de fendas como a pele de crocodilo, ou seja, não tem tanta influência como causa inicial para o aparecimento de outros tipos de degradações.

No entanto, em pavimentos rígidos o bombeamento de finos pode originar a contaminação da camada de base, propiciando o aumento da percentagem de finos e alteração das características mecânicas da camada estrutural deste pavimento, e que, como consequência, haja um pior comportamento estrutural do pavimento (fig. 3.28).

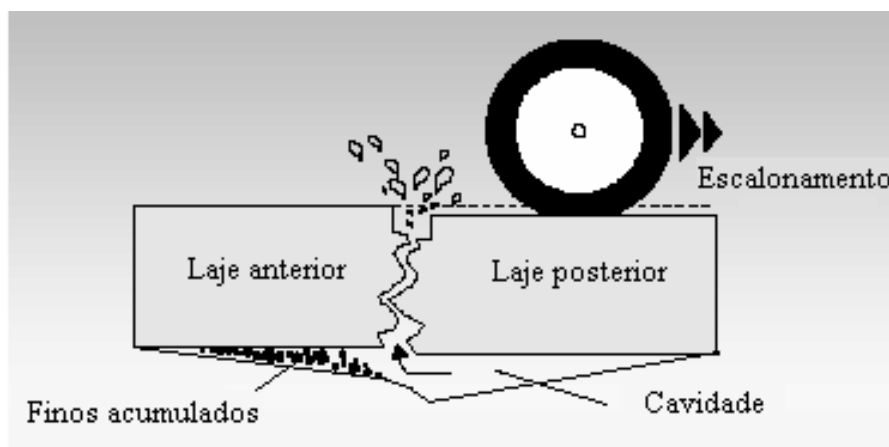


Fig. 3.28 – Fenómeno do bombeamento de finos. Neves (2007)

Para melhor compreensão do fenómeno de escalonamento das lajes, Pereira e Miranda em 1999 explicaram o mecanismo designado por escalonamento.

Conforme se constata na fig.3.29, numa primeira fase, uma das lajes sob a acção da carga do pneu deforma gradualmente a fundação humedecida (fase 1). Quando o pneu passa a carregar a laje seguinte, a primeira recupera bruscamente a sua posição inicial, ao mesmo tempo que origina a aspiração de água, casualmente misturada com finos, enquanto a segunda laje se deforma bruscamente (fase2), impulsionando a saída de água e materiais finos. Este fenómeno é repetido como se fosse um ciclo, permitindo que o fenómeno de bombeamento continue.

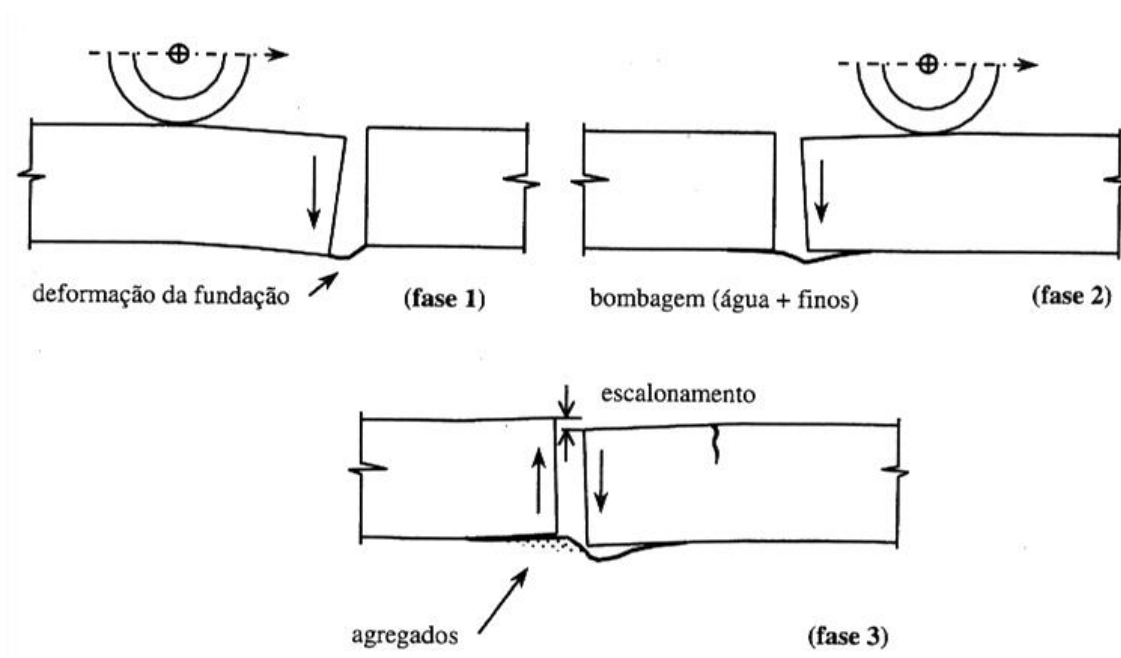


Fig. 3.29 – Fenómeno do bombeamento de finos num pavimento rígido. Pereira e Miranda (1999)

Com a repetição da actuação das cargas, provoca-se uma contínua alteração da granulometria da fundação na proximidade das juntas, colaborando para a acumulação de agregados debaixo do bordo da primeira laje e possível escassez dos mesmos sob a segunda, provocando um desnível gradual dos bordos das duas lajes (fase 3).

As lajes submetidas a esta acção de flexão alternada tendem a fendilhar, enquanto os bordos das lajes sofrem uma desagregação por acção do desgaste e choque dos pneus nos bordos mais elevados.

Na prática, esta degradação já quase não se verifica para este tipo de pavimentos, tendo em conta as disposições construtivas adoptadas. Poderá ocorrer em situações anómalas, resultantes por exemplo, de uma deficiente qualidade de construção, e/ou uma evolução anormal da fundação.

3.3.3. DEFORMAÇÕES

As deformações deste tipo de pavimento podem ser associadas ao escalonamento das lajes (foto 3.30) que é um desnível vertical entre os dois lados de uma junta ou entre dois bordos de uma fenda, e ocorre quando sob a acção repetida das cargas se reúnem as seguintes situações:

- Camada de sub-base ou solo de fundação com materiais erodíveis;
- Acesso da água às camadas de sub-base e do solo de fundação;
- Insuficiente protecção das juntas.



Foto 3.30 – Escalonamento das lajes (deformação) [7]

3.3.4. FENDILHAMENTO DAS LAJES

Em relação ao fendilhamento das lajes, as origens mais expressivas são as seguintes:

- Fadiga – a fadiga das lajes de betão deve-se à repetição das tensões de tracção fomentadas pelas cargas dos veículos, ao longo da vida do pavimento. Se o pavimento for bem dimensionado só deverão ocorrer as fendas na fase final da vida do pavimento. No entanto, quando houver insuficiência estrutural da laje de betão, seja por sub-dimensionamento, seja por deficiente qualidade dos materiais ou de execução, as fendas podem ocorrer precocemente.

- Retracção – o fendilhamento das lajes também pode ser originado pela retracção das lajes por acção da temperatura, quando por alguma razão, essa retracção for impedida. Mesmo num pavimento bem projectado e com boa execução das juntas, poderão aparecer fendas de retracção, embora distribuídas pela superfície da laje, sem influência no comportamento estrutural e funcional do pavimento.
- Encurvamento das lajes – a ocorrência de gradientes de temperatura entre as faces superior e inferior da laje de betão, provoca o encurvamento das lajes, o que conduz a esforços adicionais na laje, de acordo com o período considerado (fig.3.31). Considerando o período diurno, pode ocorrer um encurvamento para o exterior, resultando numa eventual falta de contacto entre a laje e o respectivo suporte e consequentemente originando um acréscimo de esforço de tracção na face interior da laje, no momento de aplicação das cargas relativas ao tráfego. Durante a noite, o encurvamento será na direcção oposta, gerando esforços de tracção na face superior da laje, em princípio mais severos nos bordos e nos cantos da laje. Estes movimentos são limitados, de acordo com as disposições construtivas das juntas, através da colocação de barras de transferência de carga.

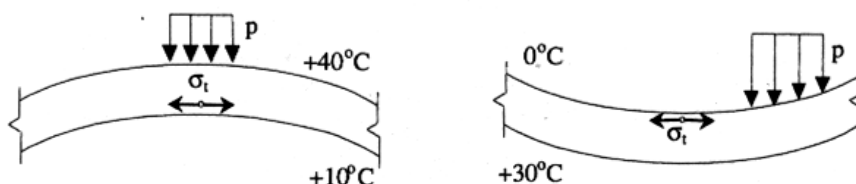


Fig. 3.31 – Encurvamento das lajes. Pereira e Miranda (1999)

Os diferentes tipos de fendilhamento associados aos pavimentos rígidos são o fendilhamento em blocos e as fendas.

O primeiro grupo (fendilhamento em blocos) é constituído por um conjunto de fendas que formam entre si uma malha, não limitado à zona de passagem dos pneus dos veículos.



Foto 3.32 – Fendilhamento em blocos [7]

O segundo grupo desta família constituído pelas fendas, pode subdividir-se em fendas diagonais, fendas longitudinais, fendas transversais, em laje e por último, as fendas de canto.

As fendas diagonais são fendas que ligam juntas ou fendas longitudinais e transversais adjacentes, situadas a uma distância de mais de 50 cm do canto das lajes.

As fendas longitudinais são paralelas ao eixo da estrada, não limitadas à zona de passagem dos pneus dos veículos (foto 3.33).

As fendas transversais são fendas perpendiculares ao eixo da estrada, isoladas ou periódicas com espaçamento variável, abrangendo parte ou toda a largura da faixa de rodagem (foto 3.34).

As fendas em laje são traduzidas em fendas longitudinais e transversais que formam lajes de menores dimensões.

Por último temos as fendas de canto que ligam dois dos lados adjacentes duma laje e que se situam a uma distância inferior a 50 cm do canto da laje (foto 3.35).



Foto 3.33 – Fendas longitudinais [7]



Foto 3.34 – Fendas transversais [7]



Foto 3.35 – Fendas de canto [7]

3.3.5. DEFEITOS DE SUPERFÍCIE

Os defeitos de superfície mais comuns em pavimentos rígidos são os seguintes: defeitos de selagem das juntas ou fendas, desagregação superficial e os defeitos das juntas.

Relativamente aos defeitos de selagem das juntas ou fendas, estes são traduzidos pela expulsão ou rotura do produto de selagem das juntas ou fendas, devido à deficiente selagem que permite a entrada e incrustação de agregados (foto 3.36).



Foto 3.36 – Defeitos de selagem das juntas ou fendas. Branco *et al* (2006)

As desagregações superficiais do betão de cimento, evidenciadas por lasqueamento ou desintegração progressiva da superfície (desprendimento da calda superficial seguida do polimento e perda de

agregados) denominam-se por desagregação superficial. Este tipo de degradação pode ter como causa a acção do desgaste do tráfego além da utilização de materiais de qualidade deficiente (foto 3.37).

Finalmente o defeito das juntas trata-se de desagregações dos bordos das juntas, que podem estar relacionados com o facto de as juntas serem demasiado estreitas. Esta degradação também se pode verificar quando ocorre o escalonamento das lajes devido ao fenómeno de bombagem dos finos (foto 3.38).



Foto 3.37 – Desagregação superficial. Branco *et al* (2006)



Foto 3.38 – Defeitos das juntas. Branco *et al* (2006)

3.4. PATOLOGIAS DOS PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS

3.4.1. FAMÍLIAS E TIPOS DE DEGRADAÇÕES DOS PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS

Nos pavimentos semi-rígidos podem ser considerados os seguintes grupos de mecanismos de degradação: fendilhamento por fadiga, fendilhamento por retracção, degradação com perda de coesão e degradação da interface.

As degradações por fendilhamento normalmente acontecem sem perda de coesão do material estabilizado com ligante hidráulico.

Os pavimentos semi-rígidos apresentam algumas patologias semelhantes tanto aos pavimentos flexíveis (à superfície) como aos rígidos (em profundidade), como o abatimento, rodeiras, empolamento, pele de crocodilo, bombeamento de finos, fendas transversais, longitudinais, degradação superficial, peladas, ninhos entre outras.

3.4.2. FENDILHAMENTO POR FADIGA

O fendilhamento por fadiga está relacionado com a fadiga da camada de base (camada hidráulica) e tem como principal causa a acção do tráfego casualmente combinada com acções de origem térmica, resultando numa falta de protecção desta camada.

Assim como no caso dos pavimentos rígidos, para um pavimento semi-rígido bem dimensionado este tipos de fendilhamento deve ocorrer apenas na parte final da vida útil deste. Este tipo de fendas pode evoluir dando origem à pele de crocodilo de malha larga. As fendas da camada hidráulica fomentam na sua vizinhança uma distribuição de tensões desfavorável ao bom comportamento mecânico da camada superior, levando à propagação das fendas até à superfície, através das camadas betuminosas.

3.4.3. FENDILHAMENTO POR RETRACÇÃO

O fendilhamento por retracção tem como resultado a propagação de fendas das camadas subadjacentes às camadas betuminosas superiores, ou seja, das camadas tratadas com ligantes hidráulicos. Pela sua natureza, estas camadas possuem fendas ou juntas de retracção, o que proporciona a penetração de água no interior das camadas do pavimento podendo colaborar para a ruína estrutural precoce do pavimento. Este tipo de degradação pode ser função da composição da mistura hidráulica, dos constituintes da mistura e da qualidade de execução da camada.

O fendilhamento por retracção ocorre de formas distintas para pavimentos semi-rígidos de estrutura directa e inversa. Nas estruturas directas, a propagação das fendas até à superfície conduz a uma perda de impermeabilidade da camada de desgaste, contribuindo para a redução da capacidade de suporte da fundação e das camadas granulares. As estruturas inversas, obtidas por intercalação de camada granular, começaram a ser utilizadas com o intuito de controlar a reflexão de fendas.

O processo de degradação do pavimento é acelerado pela entrada de água através das fendas das camadas betuminosas que contribui para o deslocamento destas camadas em relação à camada hidráulica.

Conclui-se portanto, que para este tipo de pavimento é imperativo a selagem das fendas de fadiga e, em particular as de retracção, para garantir a conservação por redução da velocidade da evolução das degradações.

3.4.4. DEGRADAÇÃO COM PERDA DE COESÃO

A perda de coesão do material da camada de base (camada hidráulica) origina degradações como a pele de crocodilo de malha estreita, ao nível da camada de desgaste, com a possível subida de finos.

Esta degradação pode estar associada ao sub-dimensionamento da camada hidráulica (deficiente teor em água ou sub-dosagem de ligante), a uma compactação incorrecta, camadas inferiores muito deformáveis ou a uma perturbação da presa da camada hidráulica devido à circulação de tráfego nos primeiros dias de vida do pavimento.

3.4.5. DEGRADAÇÃO DA INTERFACE

Nos pavimentos semi-rígidos de estrutura directa, entre a camada betuminosa de regularização e a camada de base deverá ser aplicada uma rega de colagem. A alteração destas condições de interface – degradação da interface – conduz ao aumento das tensões instaladas nas camadas betuminosas, que pode contribuir para o aparecimento de fendas, pele de crocodilo e peladas.

Como causas mais prováveis para este tipo de degradação temos: a falta de limpeza da interface durante a construção, a deficiente rega de colagem, a compacidade e espessura insuficientes das camadas betuminosas, permeabilidade excessiva da camada de desgaste, acção dos movimentos da camada de base de origem térmica e por último, a acção do fenómeno gelo-degelo.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE AS PATOLOGIAS

Como se demonstrou, nem todas as patologias têm origem na deficiente drenagem ou nas acções climáticas. De facto, estes dois factores de degradação não são os mais predominantes na origem das degradações. No entanto, eles contribuem eficazmente para a degradação prematura dos pavimentos e para a aceleração das patologias em fase incipiente.

As águas superficiais sobre o pavimento podem infiltrar-se através das suas fendas, e embora possam não ser a causa dessas fendas vão contribuir para a humedificação do solo de fundação e, consequentemente para a perda de capacidade de suporte e subsequente ruína do pavimento.

Outro aspecto a considerar são as acções climáticas, que muitas das vezes contribuem de maneira significativa para o processo de degradação. No contexto desta dissertação, as acções que melhor traduzem esta situação são as chuvadas curtas e intensas, ou um fenómeno não tão frequente no nosso país como a neve (acção gelo-degelo).

4

COMBATE AOS EFEITOS DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS

4.1. PAVIMENTOS DRENANTES

Os pavimentos drenantes são constituídos por uma camada de desgaste com uma estrutura aberta e porosa sobrejacente a uma camada de regularização impermeável. O objectivo deste pavimento é proporcionar uma rápida drenagem das águas superficiais de modo a diminuir o risco de ocorrência do fenómeno de hidroplanagem e da perda de visibilidade associada à projecção de água precipitada.

A camada de desgaste porosa permite que a água não se acumule á superfície e que seja escoada ao nível desta camada. No entanto, as camadas betuminosas subjacentes devem possuir características de impermeabilidade adequadas para que não se verifiquem problemas de infiltração e saturação ao nível das camadas de base e sub-base.

4.1.1. VANTAGENS

4.1.1.1. Evacuação da água através dos seus poros com uma drenagem vertical e posteriormente fracamente inclinada

Esta evacuação facilita assim o contacto entre as duas superfícies (pneumático e pavimento).

- Redução do risco da hidroplanagem;

Um dos principais objectivos na utilização das camadas drenantes é tentar eliminar o risco da hidroplanagem. Este fenómeno, já abordado neste trabalho, ocorre nos pavimentos impermeáveis (tradicionais) quando a água existente sobre o pavimento não se consegue libertar da superfície de contacto “pneumático - pavimento” através do relevo dos pneus.

Os pavimentos drenantes diminuem a possibilidade da existência desta película de água, a qual é absorvida devido à porosidade e permeabilidade elevada destas camadas. Esta água absorvida para dentro do pavimento através dos seus poros é conduzida até à berma.

São definidos três tipos de poros:

- Poros eficazes: que permitem o escoamento e armazenamento da água;
- Poros semi-eficazes: só permitem o armazenamento da água;
- Poros ineficazes: sem utilidade, são inclusões na mistura betuminosa sem comunicação com os outros poros, não permitindo a drenagem nem armazenamento da água.

- Redução do risco da projecção de água sobre os veículos;

Com a eliminação da película de água sobre o pavimento, a projecção de água sobre os outros veículos não se verifica. O risco de perda de visibilidade dos outros condutores fica assim acautelado.

- Eliminação do efeito de espelho que a água acumulada tende a provocar

A ausência da película de água superficial evita também a reflexão da luz dos faróis das viaturas que circulam em sentido oposto.

Aumenta assim a segurança e comodidade na circulação rodoviária.

4.1.1.2. Redução do nível de ruído provocado pelo tráfego

Apesar da sua macrotextura, com os pavimentos drenantes o nível de ruído originado pelo tráfego é menor (ainda que de forma modesta).

Esta diminuição do ruído acontece porque o pavimento apresenta uma superfície lisa conseguida pela compactação com cilindros de rolos lisos, que dispõe de forma plana os inertes no topo do pavimento devido ao elevado número de vazios deste.

Esta compactação diminui a frequência e a amplitude dos impactos entre o pneu e os pontos altos do inerte.

“A macrotextura é basicamente resultante dos vazios, que por sua vez absorvem os ruídos”. (Jaime Ribeiro, 2005)

4.1.1.3. Aumento dos coeficientes de aderência para velocidades elevadas

Com a utilização dos pavimentos drenantes, o risco de existência de águas superficiais diminui eficazmente e, por essa razão, a circulação é comparável com a praticada sobre um pavimento seco.

Por este motivo os coeficientes de aderência tendem a ser superiores quando comparados com pisos molhados.

Em França foram realizados estudos que relacionavam a aderência com a velocidade em pavimentos drenantes, e concluiu-se que com este tipo de pavimentos a circulação permitia atingir velocidades maiores devido aos elevados coeficientes de aderência.

Aliados a estas vantagens, surgem contudo inconvenientes que têm de se ter em consideração quando se pondera a adopção de uma solução deste tipo.

4.1.2. DESVANTAGENS

Quando se admite como solução camadas drenantes, estas são concebidas primordialmente por razões de segurança, conforto e comodidade.

É portanto deixado para segundo plano, o papel estrutural que deve estar atribuído a um pavimento.

Assim sendo, a camada porosa deve ser aplicada sobre um pavimento que possua capacidade estrutural para o tráfego previsto, que esteja totalmente impermeável, isento de quaisquer fissuras ou deformações, e que possua um perfil transversal adequado para permitir o escoamento das águas para as bermas.

4.1.2.1. Perda de porosidade

“A porosidade diminui com o tempo em função do tipo de tráfego e das condições ambientais envolventes; contudo, este facto não tem sido preocupante desde que os inertes sejam bem escolhidos (forma e resistência ao desgaste)”. (Jaime Ribeiro, 2005)

Este tipo de pavimentos é utilizado fundamentalmente em auto-estradas, visto que a velocidade de passagem dos veículos promove a auto-limpeza e diminui a colmatação dos poros. Nas restantes zonas a colmatação dos poros que se verifica é essencialmente superficial, permitindo o escoamento na parte inferior.

O que se verifica em meios urbanos (principalmente em estradas municipais) é que o investimento nestes pavimentos não é viável devido à perda de funcionalidade a curto prazo, proveniente da existência de acessos directos de vias em terra ou devido ao transporte de materiais mal acondicionados.

É portanto fundamental uma necessária conservação com medidas de descolmatação, as quais, a não se efectuarem, potenciam o risco de aquaplanagem caso não se tomarem medidas geométricas de precaução.

- O problema da colmatação dos pavimentos – Evolução da permeabilidade

A permeabilidade começa a diminuir logo após a aplicação das misturas devido a diversos factores, sendo o principal motivo a colmatação dos vazios. Esta colmatação tem origem no meio ambiente e também nas sujidades que, principalmente os veículos pesados, deixam cair acidentalmente das suas cargas ou dos pneumáticos. Relativamente ao meio ambiente, esta colmatação tem geralmente uma evolução uniforme e com menor expressão. No que diz respeito à colmatação com origem nas sujidades dos veículos pesados é geralmente, mais significativa e gravosa, pois provoca rápidas colmatações e uma grande dispersão dos valores obtidos de permeabilidade.

Outra situação também gravosa é o caso dos acessos não pavimentados, que tornam a colmatação muito rápida, devendo esses casos serem estudados numa determinada extensão em cada um dos sentidos separadamente. O efeito benéfico apresentado pelos pneumáticos (sucção), permite contrariar ligeiramente o fenómeno da colmatação e da sua rápida evolução. Apesar de não se constatar variação da evolução da colmatação com o índice de vazios inicial como mostram as figuras 3.1 e 3.2, as camadas drenantes devem apresentar um elevado índice de vazios inicial para evitar uma evolução rápida da colmatação dos poros. Com um elevado índice de vazios (valor máximo limitado pela coesão) as características de permeabilidade podem manter-se durante mais tempo.

- Descolmatação dos pavimentos

Devido à perda da capacidade drenante que começa logo após a realização destes pavimentos, são fundamentais as operações de descolmatação para que não se verifique o aumento do risco de aquaplanagem, no caso de não se terem tomado medidas geométricas de precaução. Sendo estas intervenções essenciais, torna-se necessário programá-las devendo ser realizadas com carácter preventivo.

“Os sucessivos ciclos de humedificação e secagem tendem a aglomerar as partículas colmatantes conferindo-lhes uma certa rigidez, dando-lhes um aspecto de cimento, mesmo sem a presença de um ligante argiloso ou químico, o que torna as operações de descolmatação ineficazes quando as permeabilidades são baixas.” (Pichon, 1993)

As operações de descolmatação não conduzem na generalidade a valores desejados. Estas operações são realizadas em duas fases, a pulverização e a aspiração. A pulverização consiste na injeção de

água a alta pressão sobre o pavimento (40 kg/cm^2 a 200 kg/cm^2), tendo atenção para não arrancar inertes do pavimento.

“A aspiração é realizada por uma turbina que efectua uma depressão, cujo valor não é possível controlar sendo dependente da máquina utilizada que trabalha com o máximo de potência.” (Brosseaud, Y. ,1993)

Para aumentar a autonomia do equipamento e atenuar o consumo de água, começa a efectuar-se a reciclagem da água complementarmente aos trabalhos de pulverização e aspiração.

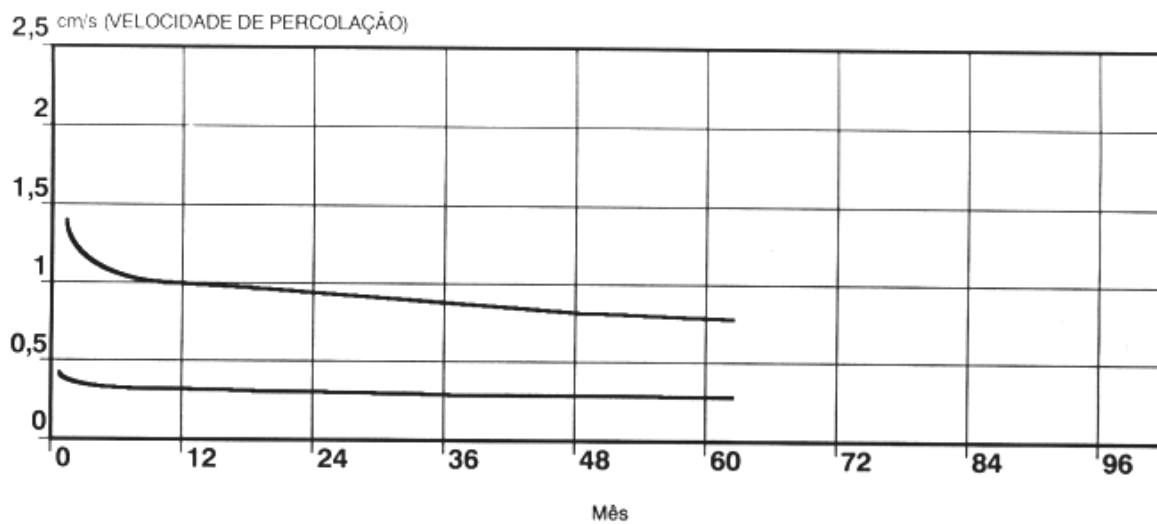


Fig. 4.1 – Evolução da permeabilidade na A63 - Delanne, Y. ; Lamalle, R. (1993)

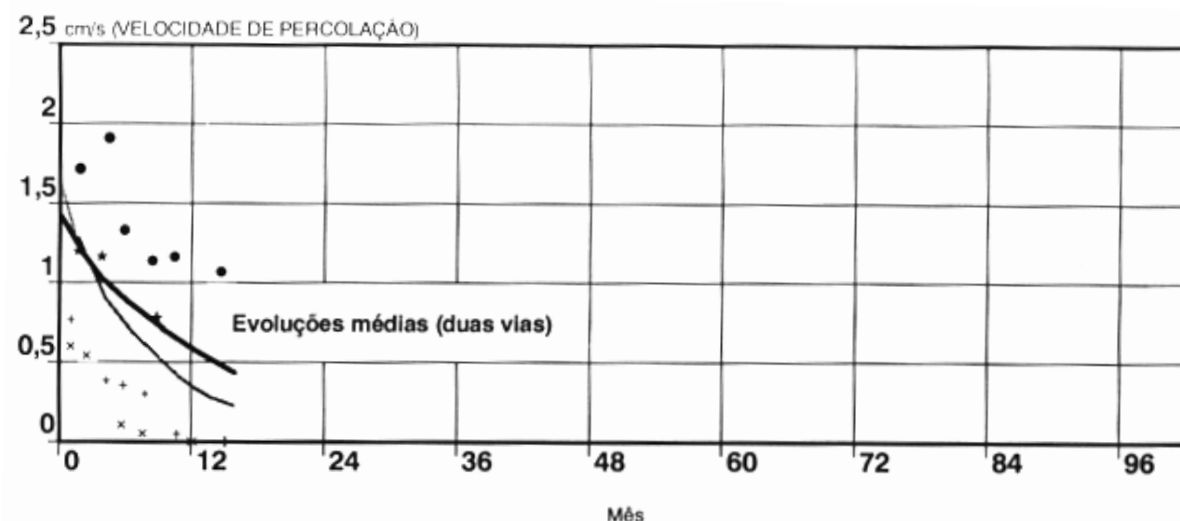


Fig. 4.2 – Evolução da permeabilidade em arruamentos urbanos - Delanne, Y. ; Lamalle, R. (1993)

4.1.2.2. Menor durabilidade

Devido à elevada porosidade da camada, o contacto do betume com o ar e a água acelera o processo de envelhecimento do ligante e propicia a perda de aderência entre os inertes e o ligante.

Deve haver especial atenção na escolha dos inertes, betumes e sua dosificação, de modo a envolver convenientemente os inertes.

4.1.2.3. Menor resistência mecânica do pavimento

Na construção destes pavimentos é importante que as juntas de trabalho sejam bem seladas, de modo a não permitir que as descontinuidades existentes influenciem o desempenho do pavimento, a posterior perda de funcionalidade e o seu envelhecimento precoce. Para isso, geralmente, o pavimento é construído utilizado pavimentadoras em paralelo com o intuito de eliminar as juntas longitudinais de construção. Acresce que, se esta medida não for tomada, se corre o risco a cortar continuidade aos poros eficazes ao longo da junta longitudinal assim construída.

4.2. TRANSIÇÃO DA SOBREELEVAÇÃO EM ESTRADAS DE DUAS VIAS

4.2.1. ANTECEDENTES

Antes da publicação do Plano Rodoviário em 1945, as estradas não eram dotadas de qualquer curva de transição. Por este motivo, a transformação do perfil transversal de alinhamento recto no perfil sobreelevado teria de ser feita num de três locais: no alinhamento recto, na curva circular ou parte no alinhamento recto e parte na curva circular.

Se a transformação fosse no alinhamento recto, a curva circular iniciava-se já com a inclinação transversal adequada para a oposição parcial à força centrífuga, mas a parte contígua ao alinhamento recto, já sobreelevado parcialmente, submeteria a forte incomodidade os utentes.

No caso de se optar por transformação do perfil transversal apenas na curva circular possibilitaria o alinhamento recto adequado, mas a parte inicial da curva apresentaria sobre elevação insuficiente para o combate à força centrífuga, declarando-se pouco segura.

Devido a estes factores, os engenheiros rodoviários, admitiam a 3ª hipótese para reduzir os efeitos negativos das hipóteses anteriores

O Plano Rodoviário de 1945 veio alterar de forma positiva o panorama acima apresentado, com a imposição da utilização de curvas de transição nas estradas.

Com a implementação de uma curva de raio variável e decrescente entre o alinhamento recto e a curva circular, obteve-se o elemento geométrico ideal para a transformação gradual do perfil transversal tipo, por aumento da sobre elevação acompanhando a redução do raio de curvatura. Desta forma, a sobre elevação podia ir aumentando á medida que o crescimento da força centrífuga o exigia.

4.2.2. ELEMENTOS BÁSICOS NO MODELO DE DISFARCE EM ESTRADAS DE DUAS VIAS

As figuras que se seguem representam o perfil transversal da faixa de rodagem característico de alinhamento recto, do ponto de osculação entre a recta e a clotoíde (ponto de raio infinito), e o perfil relativo à osculação da clotoíde com a curva circular (ponto de raio de clotoíde igual ao raio da curva circular).

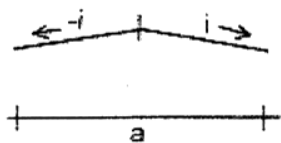


Fig.4.3 [8]

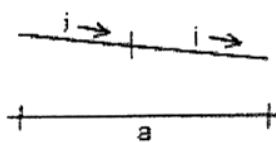


Fig.4.4 [8]

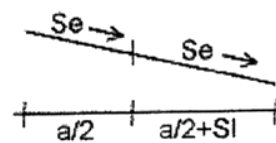


Fig.4.5 [8]

As normas de traçado da ex-J.A.E, em estradas de duas vias apontam:

- No último ponto da recta (Fig. 4.4) já todo o perfil transversal da faixa de rodagem apresenta uma inclinação i (inclinação de igual valor absoluto ao que as vias apresentam em alinhamento recto);
- No primeiro ponto da curva circular (Fig. 4.5) a sobrelevação deverá ser a indicada nos quadros referentes a este parâmetro nas curvas circulares e em estradas de duas vias;
- Nesse mesmo ponto, se o raio da curva circular for inferior a 200m, existirá uma sobrelargura nessa curva, aqui designada de Sl ;
- Essa sobrelargura deverá ser colocada na via de intradorso, originando assim, uma assimetria de largura das duas vias de circulação em relação ao eixo de piquetagem;
- Essa sobrelargura deverá variar linearmente ao longo da clotoíde, desde o ponto de raio infinito (onde esta sobrelargura será nula) até ao ponto de raio R (onde a sobrelargura será igual a Sl);
- A sobrelevação ao longo da clotoíde de extensão L variará linearmente entre i e Se ;
- Na parte de alinhamento recto imediatamente adjacente à clotoíde a variação de inclinação transversal da via de extradorso será de $-i$ a i . A extensão na qual se realizará esta transformação será designada de Ld , que será também dimensionado;
- A via de intradorso não sofre qualquer variação da inclinação transversal em alinhamento recto;
- As rotações efectuar-se-ão em torno do eixo da estrada.

4.2.3. ZONA DE VARIAÇÃO DAS INCLINAÇÕES TRANSVERSAIS E DAS LARGURAS DE FAIXA

A figura 4.6 tenta retratar uma perspectiva da zona abrangida por estas variações (curva de transição de desenvolvimento L e alinhamento recto adjacente de extensão Ld).

O eixo da via, assinalado a traço-ponto na figura encontra-se em recta entre A e O e em clotoíde entre O e P .

Será, $AO=Ld$ e $OP=L$

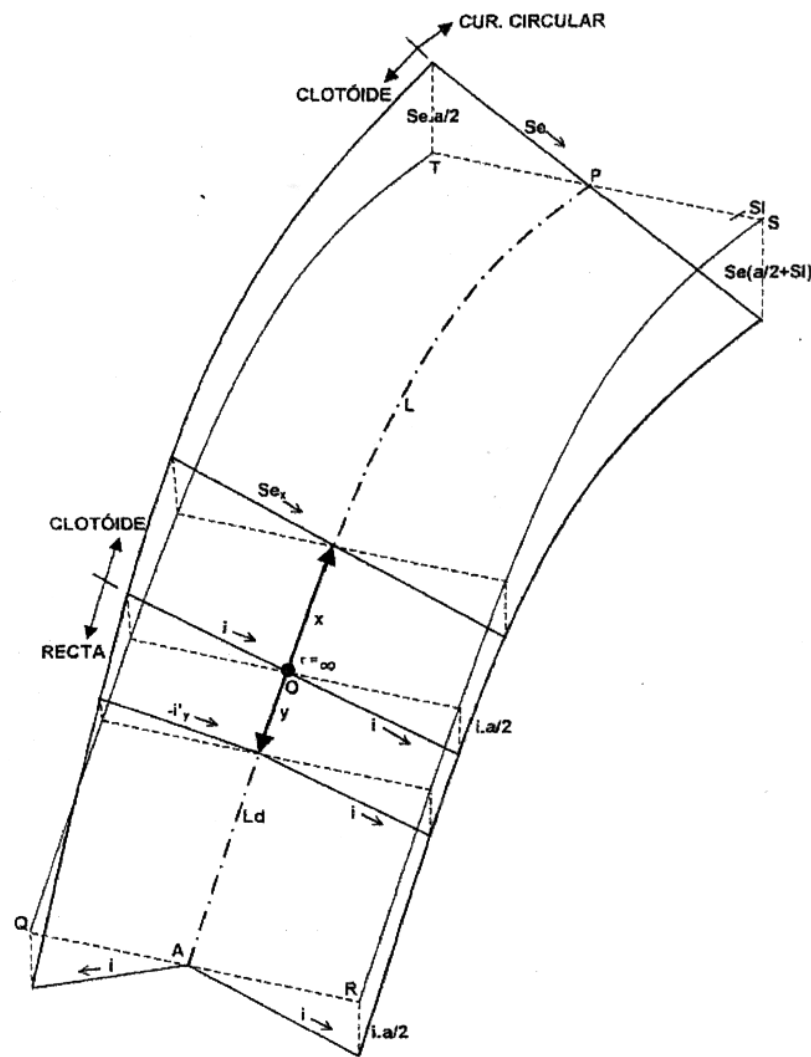


Fig.4.6 – Zona de variação das inclinações transversais. Adalberto França (2008)

O perfil transversal da faixa de rodagem será análogo ao da fig. 4.6, ou seja a largura total será $a+Sl$ e a inclinação transversal Se (a conservar na curva circular imediatamente a jusante).

No ponto O, ponto de raio infinito da clotoíde a largura será a e a inclinação transversal i .

No fragmento da recta $AO=Ld$, imediatamente a montante, a largura será a e as inclinações transversais representam a variação desde o último perfil para o qual se mantém o esquema tipo “cumeada de telhado” (ponto O) de inclinações transversais das vias simétricas i e $-i$, até ao ponto de raio infinito da clotoíde todo inclinado para o interior com o valor i .

Para efeito de cálculo de sobrelarguras ou das inclinações transversais em qualquer perfil transversal, situado a uma distância x para jusante do ponto O ou y para montante deste mesmo ponto, chegará portanto recordar que as variações são lineares, o que tem como resultado:

$$Sl_x = \frac{x}{L} \times Sl \quad (33)$$

$$Se_x = i + \frac{x}{L} \times (Se - i) \quad (34)$$

$$i_y(\text{intradorso}) = i \quad (35)$$

$$i_y(\text{extradorso}) = i - 2i \times \frac{y}{Ld} \quad (36)$$

4.2.4. PERFIL LONGITUDINAL DE EIXO E BORDOS

Os bordos da faixa de rodagem correspondem às linhas limite entre esta e a berma adjacente. Designar-se-á de bordo de intradorso a linha limite interior, tendo em atenção o sentido de curvatura da curva em análise e bordo de extradorso a linha limite exterior. Ainda que, de maneira não muito rigorosa, poder-se-á corresponder os bordos aos traços contínuos bancos que limitam a zona de circulação do tráfego.

Em hipótese académica admita-se o eixo ser horizontal. Esta situação é inconveniente do ponto de vista da drenagem das águas pluviais, sendo rejeitada pelas Normas de Traçado. Admitindo que o eixo é horizontal então a fracção do plano QRST representada na fig. 4.6 e a que compreende o eixo é de nível. Numa situação mais realista este plano seria de rampa.

Nesta situação um corte ao longo do eixo por conjunto de plano vertical e superfície de geratrizes verticais, conduzirá a um segmento de recta horizontal.

Dois cortes similares e “paralelos” por superfícies que abarquem os dois bordos, conduziriam a um perfil longitudinal de eixos e bordos como se representa na fig. 4.7.

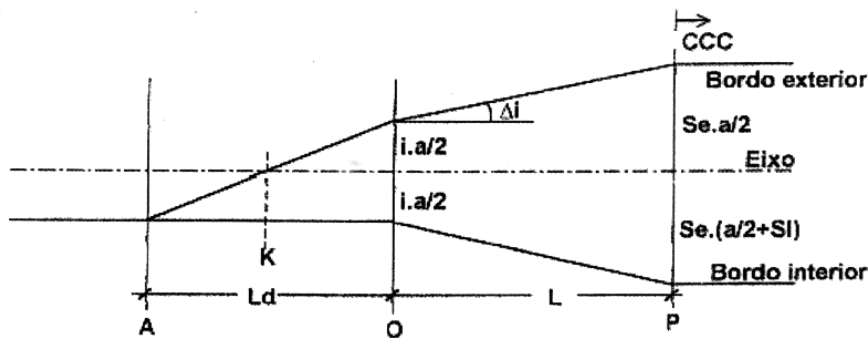


Fig. 4.7 – Perfil longitudinal de eixos e bordos, Adalberto França (2008)

Convém referir que o desenho tem escalas muito discrepantes para as cotas e para as distâncias, engrandecendo significativamente as primeiras para ajudar o entendimento do método.

4.2.5. DIMENSIONAMENTO DA CURVA DE TRANSIÇÃO (CLOTOÍDE)

As Normas de Traçado da ex-JAE conferem um limite superior ao acréscimo de inclinação no bordo de extradorso ocasionado pelo disfarce de sobrelevação. Esse acréscimo é traduzido por Δi na fig. 4.7, que será a diferença da inclinação do bordo de extradorso e a do eixo.

Este valor não pode ser muito elevado pois:

- Em alguns casos dificultaria a circulação dos veículos que transitassem sobre esse bordo exterior;
- Empenaria exageradamente a superfície da estrada na zona em estudo;
- Devido à variação da sobrelevação no tempo provocaria uma maior torção;
- Pelo menos nos pontos A e P provocaria dois pontos de quebra mais acentuada no traçado em perfil longitudinal.

O quadro 4.1, aponta os valores máximos recomendados de Δi pela ex-JAE.

Quadro 4.1 – Valores de Δi máximo. Adaptado de Adalberto França (2008)

V_B (Km/h)	Δi (%)
40	1.5
Entre 40 e 80	1.0
>80	0.8

Como:

$$\Delta i = \frac{Se \times a/2 - i \times a/2}{L} \quad \text{virá:}$$

$$\frac{(Se - i) \times a}{2L} \leq \Delta i_{MÁX} \quad , e$$

$$L_2 \geq \frac{a \times (Se - i)}{2 \times \Delta i_{MÁX}} \quad , ou$$

$$A_2 \geq \sqrt{\frac{R \times a \times (Se - i)}{2 \times \Delta i_{MÁX}}} \quad , com:$$

$R[m]$ – raio mínimo da clotoíde = raio da curva circular

$a[m]$ – largura da faixa de rodagem

$Se[]$ – sobrelevação máxima na clotoíde = sobrelevação na curva circular

$i[]$ – inclinação transversal da via de intradorso em alinhamento recto, geralmente igual a 2.5%

$\Delta i_{MÁX}[]$ – valor máximo tabelado e aceite para diferença de inclinação entre o bordo exterior e o eixo da estrada

Para garantir a inexistência do risco de hidroplanagem, o alinhamento recto adjacente à clotoíde estará condicionado pela inclinação mínima relativa do bordo exterior do alinhamento recto adjacente á clotoíde, exactamente no local onde o perfil transversal da via de extradorso é horizontal.

4.2.6. EXTENSÃO DO ALINHAMENTO RECTO ABRANGIDO NO DISFARCE DA SOBREELEVAÇÃO

Como foi exposto anteriormente, nas Normas do Traçado para estradas de duas vias, o modelo de disfarce inclui a localização na via de extradorso e em alinhamento recto, do semi-perfil transversal horizontal.

Devido a essa consideração, as mesmas normas vão exigir que a diferença de inclinação entre o bordo e eixo detenha aqui um mínimo, dado pela expressão:

$$\Delta i_{MIN}(\%) = 0.1 \times (\text{metade da largura da faixa} + \text{largura da berma}) \quad (37)$$

Assim, a extensão máxima de alinhamento recto abrangida pelo disfarce da sobrelevação vai ser:

$$Ld = \frac{i \times a}{\Delta i} \quad (38)$$

Onde:

$Ld[m]$ – extensão de recta abrangida pelo disfarce da sobrelevação

$i[\%]$ – inclinação transversal da via de extradorso em recta

$a[m]$ – largura da faixa de rodagem

$\Delta i[\%]$ – diferença de inclinação entre o bordo e o eixo

Tendo em conta o desconhecimento sobre o que está implícito no valor de 0.1, admite-se que, as Normas de Traçado apresentam:

$$\Delta i(\%) = 0.1 \times (\text{metade da largura da faixa de rodagem}) \quad (39)$$

Suprimem assim a largura da berma, esquecendo que a sua área contribuirá para a concentração de águas pluviais na zona da via de extradorso.

É importante realçar, o facto de que, o valor de Δi com a contribuição da largura das bermas é presumivelmente muito elevado atendendo ao risco da hidroplanagem em estradas deste tipo. No entanto, o valor do mesmo parâmetro, determinado apenas com a largura da faixa de rodagem é provavelmente demasiado baixo. A questão é importante uma vez que a utilização de um Δi elevado reduz drasticamente o risco de hidroplanagem. No entanto implica uma rotação rápida da via de extradorso.

Valores de rotação de 4%/s são geralmente considerados elevados, pelo que como precaução recomenda-se uma limitação deste valor nos 2%/s.

“Para isso a sugestão final seria a do valor de $\Delta i_{\min}$ ser fixada em 80% daquele que é comumente utilizado”, Adalberto França (2008)

$$\Delta i (\%) = 0.08 \times (\text{metade da largura da faixa} + \text{largura da berma}) \quad (40)$$

4.3. TRANSIÇÃO DA SOBREELEVAÇÃO EM ESTRADAS DE FAIXAS SEPARADAS

4.3.1. ESPECIFICIDADES

As especificidades que se destacam quando comparadas às das estradas de uma única faixa são:

- O risco de hidroplanagem é bastante superior em estradas de faixas separadas devido à conjugação de dois factores negativos:
 - Velocidade de circulação maior;
 - Maior largura da faixa de extradorso (relativamente à via de extradorso em estradas de duas vias) constituindo assim uma bacia de retenção das águas pluviais maior.
- Deixa de existir necessidade de regras de disfarce que aumentem a extensão com igual inclinação transversal como acontecia nas estradas de duas vias para simplicidade de construção.

4.3.2. ELEMENTOS BÁSICOS NO MODELO DE DISFARCE EM ESTRADAS DE DUAS FAIXAS

Nas estradas de duas vias adoptou-se como regra geral que a rotação se processa em torno do eixo com a finalidade de atenuar a amplitude das diferenças relativas das alturas dos dois bordos. Neste caso, em estradas de faixas separadas, com a presença de um separador central, a rotação deverá ser efectuada ao longo dos bordos interiores das faixas de rodagem. Desta forma, excluirá inclinações muito grandes no separador central, reduzindo dificuldades construtivas ou até, no caso da utilização de um separador do tipo New Jersey, permitir a sua colocação na forma horizontal como a sua base impõe. A figura 4.8 esboça este modelo de disfarce.



Fig. 4.8 – Modelo de disfarce em estradas de duas faixas. Adalberto França (2008)

A separação das faixas de rodagem possibilitará leis de disfarce desiguais nas faixas de intradorso e extradorso.

Uma vez que a inclinação transversal na faixa de intradorso é sempre superior a i (em valor absoluto), o disfarce deverá efectuar-se na clotoíde entre $-i$ e $-Se$. Sendo a inclinação transversal mínima nesta faixa igual a i (em módulo), o risco de hidroplanagem está acautelado, logo pode usar-se um modelo linear de disfarce.

Relativamente à faixa de extradorso, é normal fazer coincidir o perfil horizontal com o ponto de raio ∞ da clotoíde (embora não seja obrigatório). Desta forma, passará a existir uma fracção de recta (Ld) com variação entre $-i$ e O e ao longo da clotoíde a transição ocorrerá entre O e Se .

Devido ao risco acrescido de hidroplanagem na faixa de extradorso, adoptar-se-ão modelos distintos do linear.

4.3.3. MODELO PARABÓLICO DE DISFARCE EM EXTRADORSO

4.3.3.1. Generalidades

De seguida apresentam-se as razões impeditivas de se realizar um modelo linear de disfarce na faixa de extradorso.

A figura 4.9 representa o hipotético perfil longitudinal dos dois bordos de uma faixa de extradorso, com variação linear de sobreelevação.

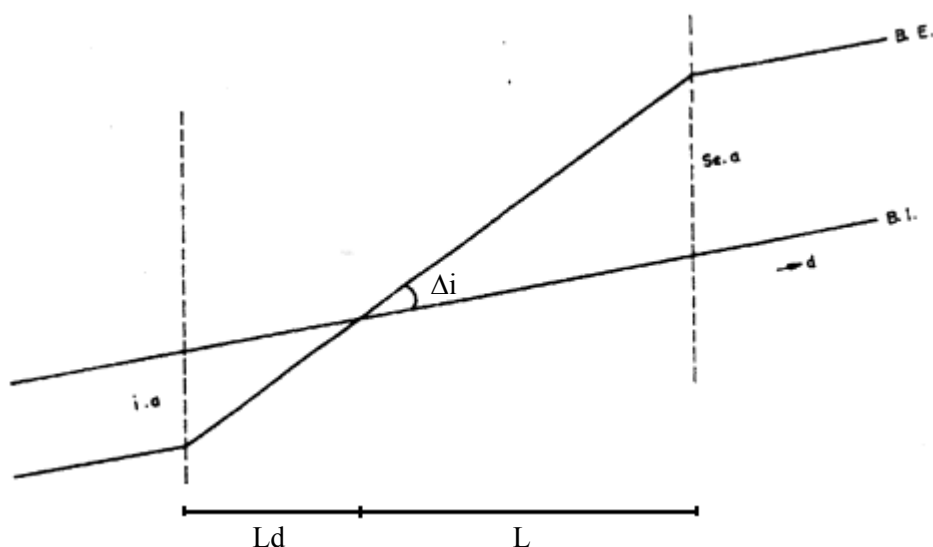


Fig.4.9 – Perfil longitudinal com variação linear. Adaptado de Adalberto França (2008)

Sendo:

$a[m]$ – largura da faixa de rodagem

$L[m]$ – distância da origem do sistema de eixos ao ponto de sobreelevação nula

$Ld[m]$ – extensão de alinhamento recto incluído no disfarce

i – inclinação da via de intradorso em alinhamento recto

Se – sobrelevação máxima no arco da clotoíde

d – inclinação do perfil longitudinal

B.I – bordo interior

B.E – bordo exterior

Δi – diferença de inclinações dos bordos exterior e interior

Por o bordo interior ser o eixo de rotação, viria:

$$\Delta i_{\min}(\%) = 0.08 \times (\text{largura da faixa} + \text{largura da berma exterior}) \quad (41)$$

Mesmo numa estrada de 2x2 vias, com 7.5m de faixa e 3.5m de berma, $\Delta i_{\min}=0.9\%$ é um valor superior ao $\Delta i_{\max}$ autorizado pelas Normas de Traçado para velocidades em estradas de faixas separadas, que é de 0.8%.

Constate-se ainda:

- Que a expressão utilizada já se encontra ligeiramente reduzida em relação ao que deveria ter sido usada conforme as Normas de Traçado;
- Que o exemplo enunciado das faixas 2x2 vias é entre as estradas de faixas separadas, bastante favorável à comparação $\Delta i_{\min} / \Delta i_{\max}$;
- Que, a este valor de 0.9%, equivaleria uma variação da sobrelevação no tempo igual a:

$$i_x = -i + \frac{i \times x}{Ld} \quad \text{Ou,}$$

$$i_x = -i + \frac{\Delta i \times x}{a} \quad , \text{ e finalmente}$$

$$\frac{di_x}{dt} = \frac{v \times \Delta i}{a} \quad (42)$$

Adoptando $v=120\text{Km/h}$ $\frac{di_x}{dt} = 4\%/s$ com $a=7.5\text{m}$, teremos:

A rotação angular da faixa corresponderá a $v=0.04 \times 7.5=0.3\text{m/s}$ e

$A=0.3^2/7.5=0.012\text{m/s}^2$, valor semelhante ao que obteríamos para o mesmo parâmetro em estradas de duas vias;

- Que valores de Δi na ordem dos 0.9% são muito elevados para velocidades características de estradas com faixas separadas.

Todas estas razões indicam como melhor opção adoptar uma lei de disfarce de sobrelevação diferente, que saliente a inclinação longitudinal no ponto de inclinação transversal nula, mas também que a minimize na extensão integral submetida ao disfarce. Este modelo distinto traduz-se numa lei do tipo parabólico do 3º grau. Seguidamente serão demonstrados dois modelos distintos de disfarce, embora sigam ambos leis parabólicas de 3º grau.

4.3.3.2. Disfarce parabólico do 3º grau (tipo I)

A lei da variação da sobrelevação através do modelo parabólico, que se recomenda para a faixa de extradorso, resulta basicamente, de considerações relacionadas com o problema da hidroplanagem. Com efeito, este problema põe-se com maior acuidade no caso das auto-estradas devido a três factores concomitantes:

- As elevadas velocidades de circulação;
- As grandes larguras da faixa de rodagem e bermas exteriores, a que se junta a existência de bermas interiores;
- O tipo de pavimentação, que por razões de comodidade não apresenta grande rugosidade.

É sempre na faixa de extradorso que se localiza a situação mais grave de hidroplanagem, já que aí existe obrigatoriamente um perfil transversal de inclinação nula, uma vez que a faixa de rodagem estará inclinada para o exterior na recta adjacente à curva e para o interior ao longo da parte circular.

A situação será tanto mais crítica quanto mais pequena é a inclinação do perfil longitudinal d e ainda quanto menor for a inclinação secundária δ , diferença de inclinação entre os bordos interior e exterior.

Neste contexto optou-se pela utilização na faixa de extradorso de uma lei de variação da sobrelevação parabólica do 3º grau, a qual é representada na fig. 4.10 através de um perfil longitudinal dos bordos interior e exterior da faixa de extradorso, na zona de disfarce.

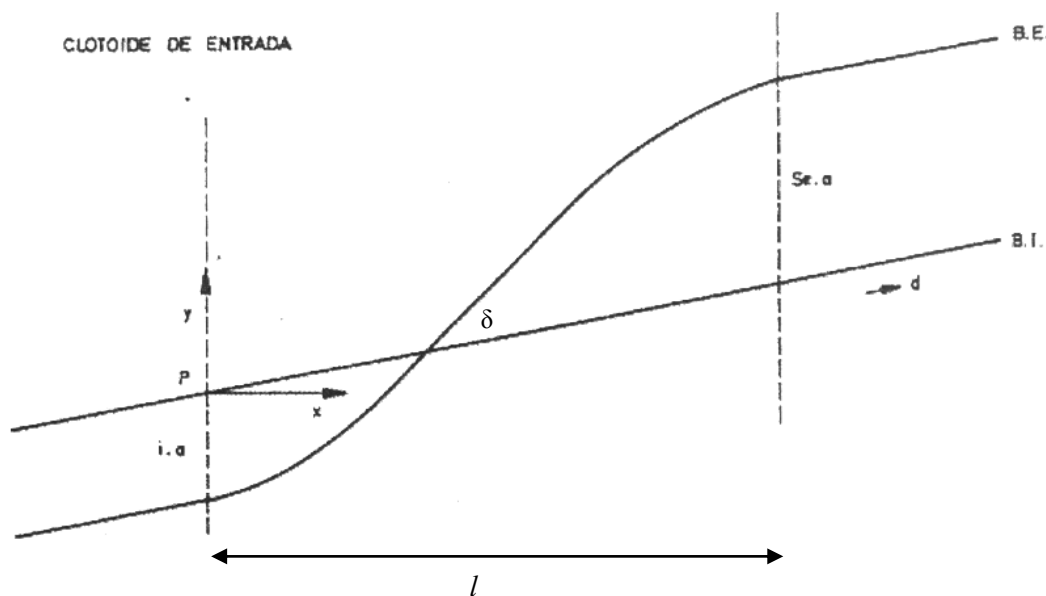


Fig.4.10 – Perfil longitudinal da faixa de extradorso na zona de disfarce. Adaptado de Adalberto França (2008)

A expressão da lei de variação da inclinação transversal na clotoíde de entrada considerando $l=L+Ld$:

$$S_x = \left(3 - \frac{2x}{l}\right) \times \left(\frac{x}{l}\right)^2 \times (Se + i) - i \quad (43)$$

Equação do bordo exterior na clotoíde de entrada no sistema de eixos PXY:

$$y = d \times x + a \times \left[\left(3 - \frac{2x}{l}\right) \times \left(\frac{x}{l}\right)^2 \times (Se + i) \right] - i \times a \quad (44)$$

A lei da variação da inclinação transversal na clotoíde de saída:

$$S_x = \left(\frac{l-x}{l}\right)^2 \times \left(3 - \frac{2(l-x)}{l}\right) \times (Se + i) - i \quad (45)$$

Equação do bordo exterior na clotoíde de saída num sistema de eixos colocado no ponto de osculação clotoíde/curva circular:

$$y = dx + a \times \left[\left(\frac{l-x}{l}\right)^2 \times \left(3 - \frac{2(l-x)}{l}\right) \times (Se + i) \right] - i \times a \quad (46)$$

As leis de variação das inclinações longitudinais nos dois bordos são as seguintes:

Na clotoíde de entrada:

Bordo interior: $\frac{dy}{dx} = d \quad (47)$

Bordo exterior: através da derivação da equação do bordo exterior (44)

Vem:

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= d + a \times \frac{d}{dx} \times \left\{ \frac{Se+i}{l^3} \times [(3l - 2x) \times x^2] - i \right\} = \\ &= d + \frac{6 \times a}{l^3} \times (Se + i) \times [x(l - x)]\end{aligned}\quad (48)$$

Na clotoíde de saída.

Bordo interior: $\frac{dy}{dx} = d$

Bordo exterior:

$$\frac{dy}{dx} = d - \frac{6 \times a}{l^3} \times (Se + i) \times [x(l - x)] \quad (49)$$

Uma análise da figura torna evidente que, no ponto em que ambos os bordos se encontram à mesma cota, perfil crítico de inclinação nula, a inclinação secundária δ é superior à inclinação $\delta_{\text{média}}$ que surgiria no caso de se usar um método de disfarce linear.

Esta situação proporcionará maior garantia de evitar problemas de drenagem na zona crítica de inclinação transversal próxima da nula, devido a ser maior nesse local a inclinação longitudinal do bordo exterior, a qual é, em média, igual a:

$$d \pm \frac{a}{l} (Se + i)$$

Correspondendo o sinal positivo e negativo da inclinação secundária à clotoíde de entrada e saída, respectivamente.

Analisando o caso acima mencionado (de uma estrada 2x2 vias com 7.5m de faixa e 3.5m de berma), e sabendo que as sobrelevações correntes em estradas de faixas separadas (auto-estradas) variam entre 2.5% e 5%, é possível verificar para estes dois extremos, a localização do perfil crítico de inclinação nula e, conseqüentemente, o valor nesse local, da inclinação secundária.

Igualando a zero a expressão (41) para os dois valores da sobrelevação indicados, conclui-se que, na faixa de extradorso, o perfil de inclinação transversal nula se localiza:

Para $Se=2.5\%$ em

$$x=l/2$$

Para $Se=5\%$ em

$$x=0.387l$$

Substituindo os valores de x encontrados na expressão (46), verifica-se que a inclinação do bordo de extradorso é:

Para $Se=2.5\%$

$$\frac{dy}{dx} = d + \frac{1.5 \times a}{l} (Se + i) \quad (50)$$

Para $Se=5\%$

$$\frac{dy}{dx} = d + \frac{1.42 \times a}{l} (Se + i) \quad (51)$$

O valor de δ no ponto de sobrelevação nula será então:

Para $Se=2.5\%$

$$\delta = 1.5 \times \delta_{médio} \quad (52)$$

Para $Se=5\%$

$$\delta = 1.42 \times \delta_{médio} \quad (53)$$

Onde $\delta_{médio} = \frac{a \times (Se + i)}{l}$ seria a inclinação secundária que se obteria para disfarce linear.

Verifica-se assim que, na zona de sobrelevação nula, se consegue com este método um acréscimo da inclinação secundária variando entre 42% e 50% em relação ao modelo de disfarce linear, que é favorável sob o ponto de vista da redução do risco de hidroplanagem possível.

Este método de disfarce, oferecendo a vantagem citada, tem, no entanto, dois inconvenientes:

- Um ligeiro acréscimo na incomodidade;
- Durante a execução da obra, apresenta uma maior dificuldade em se conseguir reproduzir no terreno, com precisão satisfatória, as cotas representativas do bordo de extradorso.

Com o objectivo de aumentar a inclinação secundária para o risco de hidroplanagem ser menor, propõe-se o método que a seguir se descreve.

4.3.3.3. Disfarce parabólico do 3º grau (tipo II)

Este modelo de disfarce parabólico para a faixa de extradorso abrange alinhamento recto, de forma a permitir que o perfil horizontal se situe no ponto da clotoíde de raio infinito.

Na clotoíde de transição

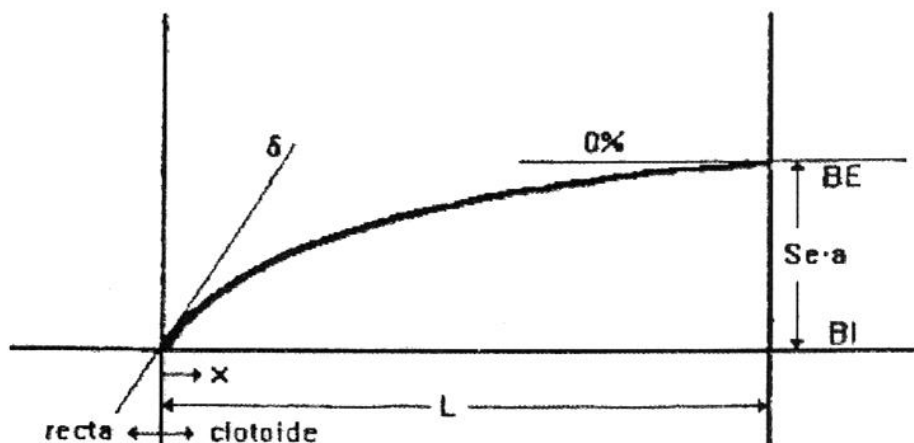


Fig.4.11 – Modelo de disfarce parabólico de 3º grau na clotoíde de transição. Adalberto França (2008)

A fig. 4.11 representa a posição dos bordos interior e exterior da faixa de extradorso, ao longo da clotoíde de transição de entrada na curva composta.

Procurou-se então uma expressão para a sobrelevação, do tipo:

$$S_x = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad (54)$$

que admitisse as seguintes condicionantes:

- A sobrelevação deverá ser nula para o ponto inicial da clotoíde e atingir no último ponto desta curva de transição o valor máximo proposto pelas Normas de Traçado da ex-J.A.E, o qual é designado por S_e ;
- A tangente à curva descrita pelo bordo de extradorso no seu ponto de origem deverá ser δ . Para evitar a acumulação de águas pluviais, com linhas de corrente de fraca inclinações e grandes extensões, o valor de δ variará com a largura da faixa de rodagem mantendo-se sempre suficientemente elevado na vizinhança do perfil de inclinação nula. Sendo este valor (δ) a diferença de inclinação entre os bordos de intradorso e extradorso, é evidente que no caso do disfarce parabólico variará. No presente caso δ é o valor da tangente à curva do bordo de extradorso no ponto de sobrelevação nula. Para prevenir o risco de hidroplanagem este δ promove uma mais rápida variação da sobrelevação na proximidade do perfil de inclinação transversal nula;
- A tangente à curva descrita pelo bordo exterior no último ponto da clotoíde deve ser paralela ao bordo interior, de forma a evitar descontinuidade de inclinação longitudinal na transição para a curva circular central.

A tradução analítica destas condicionantes é dada por:

$$para\ x = 0 \Rightarrow S_x = 0$$

$$para\ x = L \Rightarrow S_x = Se$$

$$para\ x = 0 \Rightarrow aS'_x = \delta$$

$$para\ x = L \Rightarrow aS'_x = 0 \quad (55)$$

A equação que representa o bordo exterior da faixa de extradorso será então do tipo:

$$y = aS_x = a \times (Ax^3 + Bx^2 + Cx + D) \quad (56)$$

E a sua derivada:

$$y' = aS'_x = a \times (3Ax^2 + 2Bx + C) \quad (57)$$

Atendendo às expressões (54) e (57), as quatro condições referidas em (55) traduzem-se por:

$$D = 0$$

$$L^3A + L^2B + LC = Se$$

$$a \times C = \delta$$

$$a(3L^2A + 2LB + C) = 0 \quad (58)$$

Com a resolução do sistema, chega-se aos seguintes valores para os parâmetros:

$$A = \frac{-2Se + \delta/aL}{L^3} \quad (59)$$

$$B = \frac{2Se + \delta/aL}{L^2} \quad (60)$$

$$C = \frac{\delta}{a} \quad (61)$$

Então, a expressão que traduz a variação da sobreelevação ao longo da clotoíde de entrada na curva composta passa a ser:

$$S_x = \frac{-2Se + \delta/aL}{L^3} + \frac{3Se + 2\delta/aL}{L^2}x^2 + \frac{\delta}{a}x \quad (62)$$

Em que:

S_x – sobreelevação num perfil a distancia x da origem da clotoíde

Se – sobreelevação máxima na clotoíde a manter ao longo da curva circular central

δ – inclinação secundária (diferença entre os bordos interior e exterior) no ponto de sobreelevação nula

$a[m]$ – largura da faixa de rodagem

$L[m]$ – desenvolvimento de cada arco de clotoíde

$x[m]$ – distância entre os perfis de inclinação nula e S_x

O raio de curvatura será variável ao longo de cada curva e determinável pela expressão:

$$R = \frac{[1 + a^2(3A^2x + 2Bx + C)^2]^{3/2}}{a(6Ax + 2B)} \quad (63)$$

Após a determinação da expressão, é importante ainda analisar se a concordância convexa originada no bordo exterior por este modelo de disfarce, não provoca incomodidades excessivas. Para essa análise, dever-se-á calcular o valor do raio mínimo da parábola de 3º grau, que equivalerá ao menor valor da expressão (61).

No alinhamento recto

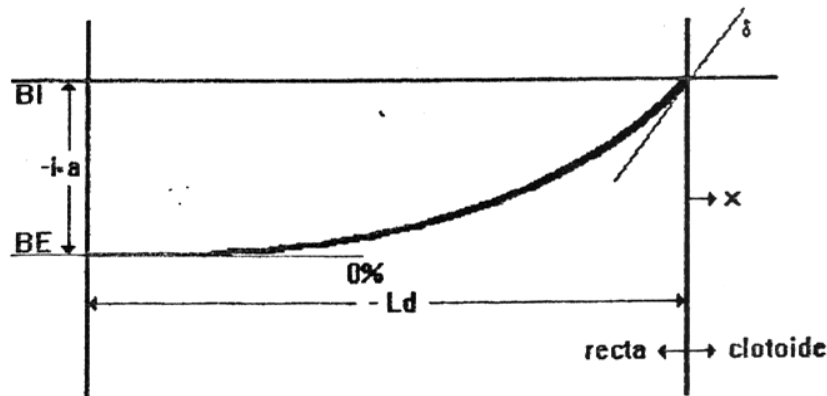


Fig.4.12 – Modelo de disfarce parabólico de 3º grau no alinhamento recto. Adalberto França (2008)

Na figura 4.12 é visível a extensão de alinhamento recto abrangido pelo disfarce da sobrelevação, desde o ponto de inclinação transversal $-i$ até ao perfil horizontal situado no ponto de entrada na clotoíde de extradorso; sendo i a inclinação transversal típica de alinhamento recto.

Considere-se L_d a extensão da recta de extradorso abrangida por este disfarce da inclinação transversal.

Procurou-se então a expressão do tipo:

$$i_x = Ex^3 + Fx^2 + Gx + H \quad (64)$$

que respeita-se as seguintes condicionantes:

- No ponto onde se inicia o disfarce a inclinação transversal da faixa de rodagem de extradorso será de $-i$;
- No ponto de entrada na clotoíde essa inclinação transversal será nula;
- A tangente à curva côncava descrita pelo bordo de extradorso no ponto de osculação entre alinhamento recto e a clotoíde deverá ser em módulo igual a δ , de forma a garantir continuidade de tangentes à curva representativa do bordo exterior.
- A tangente à curva descrita pelo bordo exterior no ponto onde se inicia o disfarce, deverá ser paralela ao bordo interior, de forma a acautelar continuidade na inclinação longitudinal dessa linha na passagem de alinhamento recto para clotoíde.

A tradução analítica dessas condicionantes será:

$$\text{para } x = 0 \Rightarrow i_x = 0$$

$$\text{para } x = L_d \Rightarrow i_x = -i$$

$$\text{para } x = 0 \Rightarrow ai'_x = -\delta$$

$$\text{para } x = Ld \Rightarrow ai'_x = 0 \quad (65)$$

A equação que representa o bordo exterior da faixa de extradorso será então do tipo:

$$y = a \times i_x = a \times (Ex^3 + Fx^2 + Gx + H) \quad (66)$$

E a sua derivada:

$$y' = a \times (3Ex^2 + 2Fx + G) \quad (67)$$

Atendendo às expressões (64) e (67), as quatro condições referidas em (65) traduzem-se por:

$$H = 0$$

$$Ld^3E + Ld^2F + LdG = -i$$

$$a \times G = -\delta$$

$$a(3ELd^2 + 2FLd + G) = 0 \quad (68)$$

Com a resolução do sistema, chega-se aos seguintes valores para os parâmetros:

$$E = \frac{2i - \delta/a \times Ld}{Ld^2} \quad (69)$$

$$F = \frac{-3i + 2\delta/a \times Ld}{Ld^2} \quad (70)$$

$$G = \frac{-\delta}{a} \quad (71)$$

Vem então, para a expressão que traduz a variação da inclinação ao longo do alinhamento recto adjacente à clotoíde e na faixa de extradorso:

$$i_x = \frac{2i - \delta/a \times Ld}{Ld^3} x^3 + \frac{-3i + 2\delta/a \times Ld}{Ld^2} x^2 - \frac{\delta}{a} x \quad (72)$$

Utilizando o mesmo sistema de eixos que no caso relativo à variação de S_x ao longo a clotoíde, ou seja com x contado a partir do ponto de osculação do alinhamento recto com a clotoíde assumindo assim valores negativos ao afastar-se desse ponto.

4.4. JUSTIFICAÇÃO DOS MODELOS DE DISFARCE PREFERÍVEIS

4.4.1. EM ESTRADAS DE FAIXA ÚNICA (ESTRADAS DE DUAS VIAS)

O modelo de disfarce em estradas de duas vias segundo as Normas do Traçado deve ter rotação em torno do eixo, ter uma variação linear, e ter uma transformação da via de intradorso de i para Se , e na via de extradorso de $-i$ a i (alinhamento recto) e de i a Se (clotoíde).

Este modelo de variação **linear** é o mais adequado, uma vez que o risco de hidroplanagem em estradas deste tipo é muito reduzido.

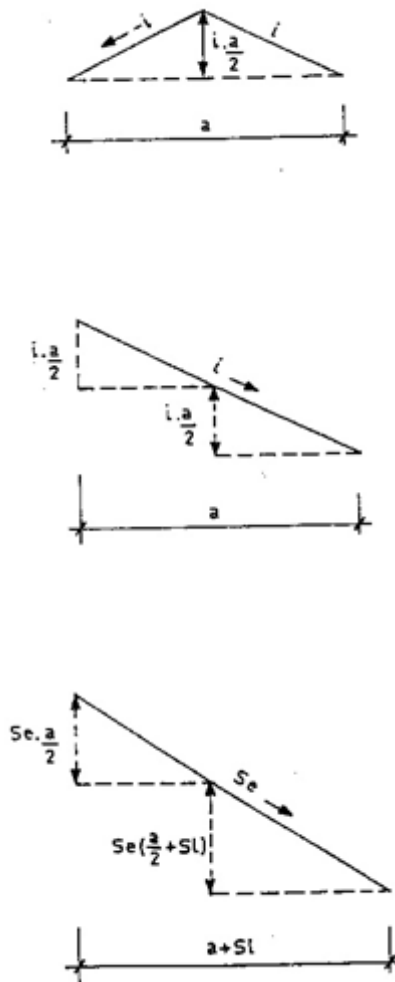


Fig.4.13 – Modelo de disfarce em estradas de duas vias. Adalberto França (1995)

4.4.2. EM ESTRADAS DE FAIXAS SEPARADAS (ESTRADAS DE VIAS MÚLTIPLAS)

Se o modelo utilizado fosse linear, teríamos para a *faixa de extradorso* a seguinte representação:

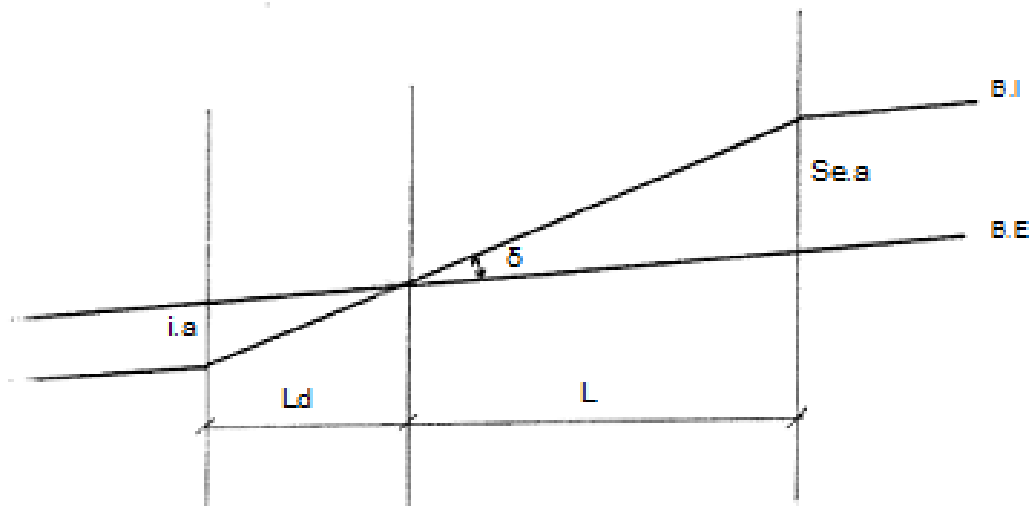


Fig.4.14 – Modelo linear para a faixa de extradorso em estradas de faixas separadas. Adaptado de Adalberto França (2008)

No caso da *faixa de intradorso*:

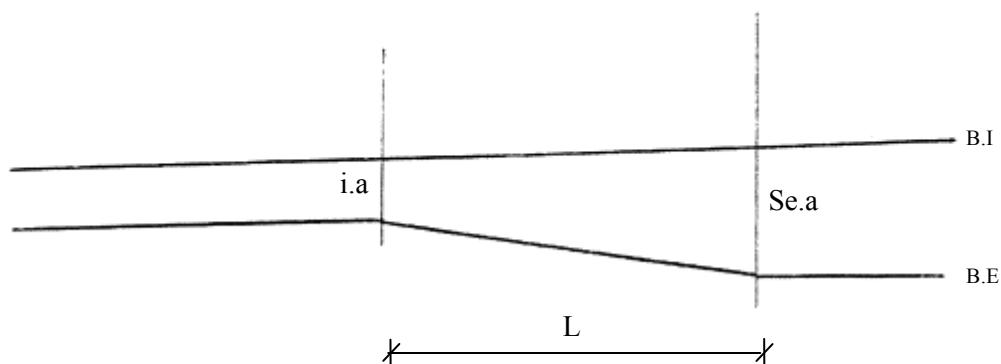


Fig.4.15 – Modelo linear para a faixa de intradorso em estradas de faixas separadas. Adaptado de Adalberto França (2008)

O modelo na *faixa de extradorso* deve ser **parabólico do 3º grau**:

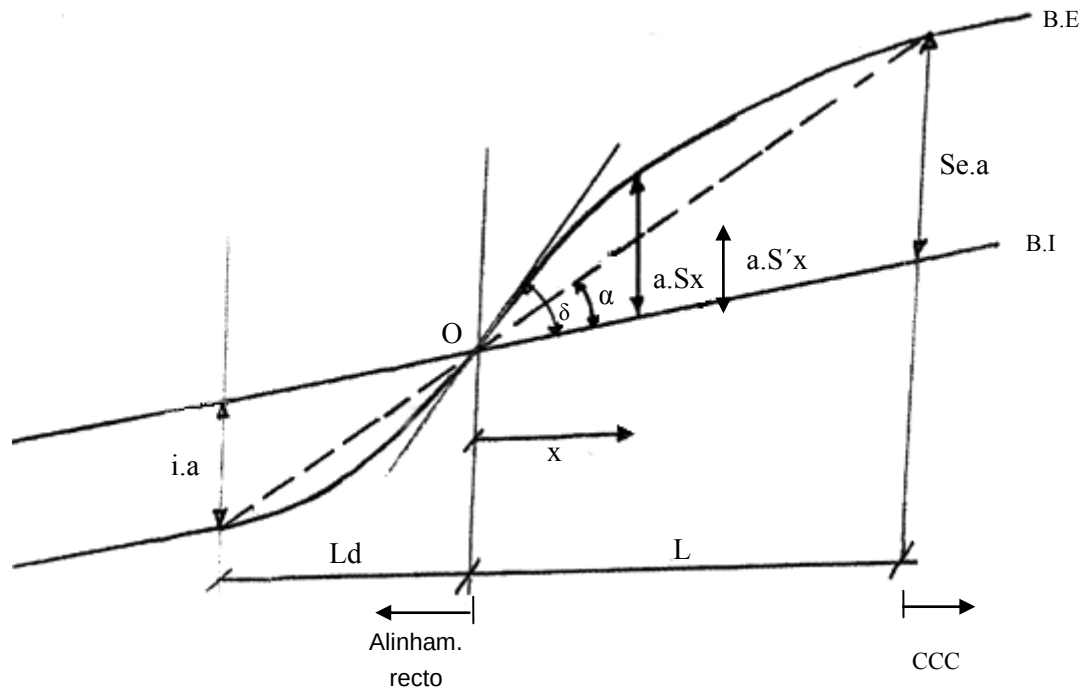


Fig.4.16 – Modelo parabólico de 3º grau vs. Modelo linear para a faixa de extradorso em estradas de faixas separadas. Adalberto França (2008)

Com:

— Disfarce parabólico

---- Disfarce linear

Constata-se que no ponto genérico à distância x do ponto O:

$$aSx > aS'x \Rightarrow Sx > S'x \quad (73)$$

e

$$\delta > \alpha \quad (74)$$

Sabendo que uma maior inclinação longitudinal associada a um mais rápido afastamento de zero na inclinação transversal reduz o risco de hidroplanagem, deve desta forma optar-se pelo modelo de disfarce parabólico.

É relevante ter sempre em conta o facto de que com um δ elevado se previne o risco de hidroplanagem mas aumenta a incomodidade. Para verificar a comodidade é necessário recorrer ao cálculo do raio de curvatura mínimo na parábola, sendo:

$$y = a \times (Ax^3 + Bx^2 + Cx + D) \quad (75)$$

Então:

$$R_{min} = -\frac{1}{a \times (6AL + 2B)} \text{ se } A \text{ e } B \text{ do mesmo sinal} \quad (76)$$

$$R_{min} = -\frac{[1 + C^2]^{\frac{3}{2}}}{2B + a} \text{ se } A \text{ e } B \text{ de sinais contrários} \quad (77)$$

O modelo na *faixa de intradorso* deve ser **linear**

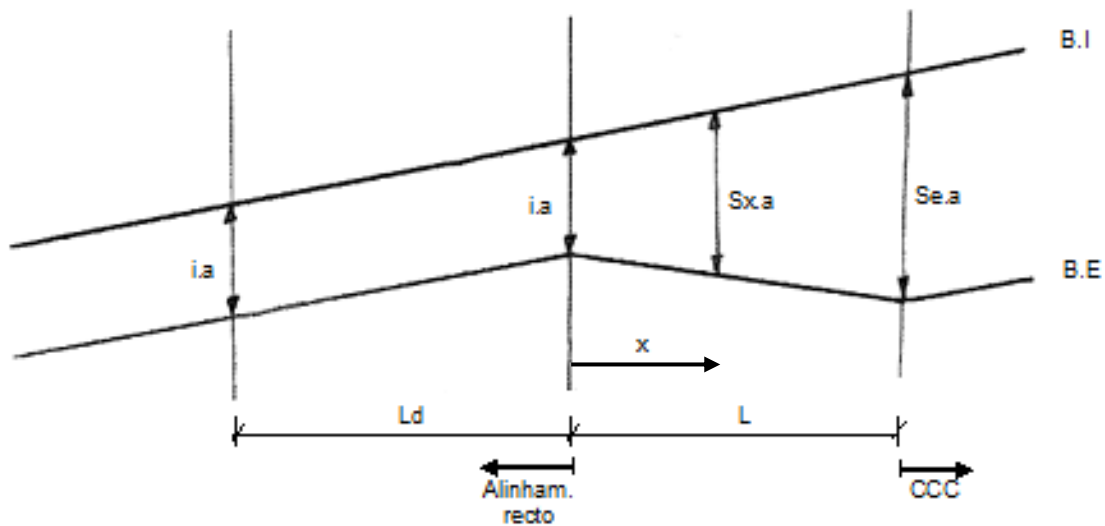


Fig.4.17 – Modelo linear para a faixa de intradorso em estradas de faixas separadas. Adaptado de Adalberto França (2008)

Calculando o valor de S_x (sobreelevação num perfil da clotoíde à distância x do ponto 0) temos:

$$Sx \times a = \frac{(Se - i) \times a \times x}{L} + i \times a \quad (78)$$

ou

$$Sx = (Se - i) \times \frac{x}{L} + i \quad (79)$$

Considerando ser i a inclinação transversal mínima que previne a hidroplanagem, então em curva ($Sx > i$) esse risco não existe, logo o modelo deve ser linear.

4.5. A SOBREELEVAÇÃO E A HIDROPLANAGEM – EVENTUAIS CORRECÇÕES EM CLOTOÍDE

É fundamental acautelar os riscos de hidroplanagem (em estradas suficientemente largas) ou do acréscimo nas infiltrações por deficientes inclinações transversais, nas zonas em clotoíde, ou na inexistência destas quando existe inversão do sinal da sobrelevação.

As inclinações transversais das plataformas das estradas são em recta 2.5%, em curva circular S_e , e em clotoíde variando entre estes dois limites. Estas inclinações usuais são suficientes para expulsar lateralmente as águas pluviais, acautelando assim a ocorrência da hidroplanagem. Desde que estejam resolvidas todas as imperfeições no perfilamento da camada de desgaste, apenas nos locais onde a inclinação transversal seja razoavelmente inferior aos regulamentares 2.5%, esse facto tem viabilidade de ocorrência.

Chegará portanto, numa estrada correctamente projectada a nível de traçado, incidir a atenção nos locais do extradorso das curvas e nas rectas adjacentes, onde é impossível evitar transições de inclinação transversal da proximidade de -2.5% a perto de 2.5%. Considerando estes limites de variação, é forçosamente inevitável a existência de uma faixa de rodagem horizontal, nas estradas de faixas separadas e no extradorso das curvas.

Face a esta situação, a atitude usualmente adoptada baseia-se em controlar a inclinação longitudinal do bordo exterior em relação à do bordo interior, nos locais onde a inclinação transversal é muito próxima de zero. Este mecanismo de defesa tenderá a aumentar o empenamento da faixa de rodagem. Este empenamento deve ser controlado. No entanto, quando comparado com o risco de hidroplanagem é uma consequência de menor gravidade.

Note-se que nestes locais de mudança de sinal da inclinação transversal, a água precipitada junto ao bordo exterior e para jusante do perfil horizontal, pode ser conduzida longitudinalmente para montante pelo declive da rasante e, ultrapassando esse perfil, reaproximar-se do mesmo bordo já que encontra uma inclinação transversal de sinal contrário. Geram-se assim linhas de corrente descrevendo curvas mais ou menos acentuadas, com “centro” no ponto de intersecção da linha transversal de inclinação nula com um dos bordos. É portanto previsível que inclinações longitudinais elevadas originem linhas de escoamento grandes e de pequena curvatura que se prolongarão por amplas extensões sobre e sob a faixa de rodagem provocando infiltrações.

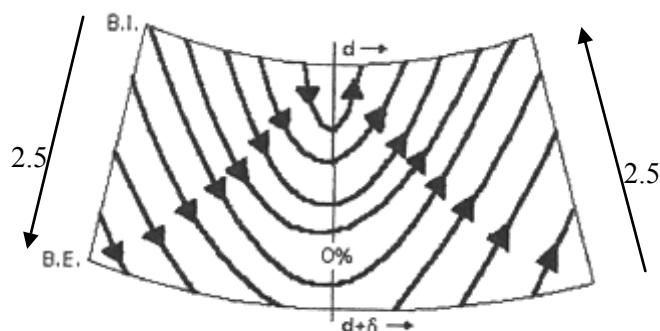


Fig.4.18 – Traçado de uma clotoíde em planta com linhas de escoamento das águas superficiais. Adaptado de Adalberto França, António Vasconcelos (1991)

Estas zonas de inclinação transversal próxima de zero, quando associadas a pequenas inclinações longitudinais, tornam-se ainda mais perigosas. Isto acontece pois, embora as extensões das linhas de corrente diminuam, estas passam a ter maiores curvaturas e menores inclinações médias, o que fará aumentar a altura de água nestes escoamentos superficiais. O valor do parâmetro δ apresentado como sugestão em 4.2.6, reflecte a maior ou menor periculosidade para os potenciais riscos de hidroplanagem.

Tendo presente a improbabilidade de hidroplanagem em estradas de duas vias (faixa única) e para simplificação da escrita e leitura, a inclinação secundária δ mencionada posteriormente exprimirá a diferença de inclinações longitudinais entre os bordos exterior e interior da faixa de rodagem do extradorso, em estradas de faixas separadas.

Pode então resumir-se o exposto da seguinte forma:

- É essencial fixar valores mínimos para a inclinação secundária, pois podem conduzir a situações de insegurança quando são muito baixos, originadas por acumulação de águas pluviais na vizinhança do perfil horizontal;
- Estudos teóricos concluíram que em estradas de vias múltiplas o risco de hidroplanagem aumenta à medida que diminui a inclinação do perfil longitudinal associado. Daí que, para evitar situações críticas vizinhas do início da hidroplanagem, a limitação inferior de δ seja aumentada para estas estradas;
- É oportuno optar por um modelo de disfarce de sobrelevação parabólico do 3º grau em estradas de faixas separadas. Relativamente à equação que traduz as cotas do bordo exterior da faixa de extradorso, este modelo de disfarce deve levar à coincidência entre o ponto de inclinação transversal nula e o de mudança do sinal da curvatura;
- A obrigatoriedade do respeito dos valores mínimos de δ foram introduzidos pela primeira vez na última versão das Normas do Traçado da ex-JAE. É aí proposta a aplicação do valor mínimo:

$$\delta[\%] \geq 0.1 \times b \quad (80)$$

em que $b[m]$ é a largura da faixa mais a largura da berma exterior. Conforme se sugeriu anteriormente por razões de comodidade de circulação,

$$\delta[\%] \geq 0.08 \times b \quad (81)$$

Em situações de beneficiações a verificação do limite inferior de δ exigido, para acautelar o risco de hidroplanagem na plataforma actual, pode ser realizada por sobreposição dos perfis longitudinais executados a partir dos dados fornecidos pelo levantamento topográfico. Colocando no mesmo perfil os bordos interior e exterior de cada faixa, facilmente se apuram os locais onde o bordo exterior se eleva em relação ao interior. Estes locais, devidamente detectados e assinalados nas Peças Desenhadas devem corresponder ao extradorso da curva. Fazendo o cálculo das diferenças de inclinação entre estes bordos é possível avaliar se o valor de δ existente é ou não adequado. Se o valor de δ for inferior ao valor sugerido anteriormente indicará um local de existe o risco potencial de circulação originado pela hidroplanagem.

Em 4.3.3 foram estudados distintos modelos de disfarce parabólico de 3º grau a utilizar em condições análogas às agora realizadas.

Para verificar a comodidade de circulação em todos os casos, deve determinar-se o raio mínimo da parábola de 3º grau gerada por este modelo de disfarce.

Muitas vezes torna-se esclarecedor cruzar esta informação geométrica transversal com os resultados dos deflectómetros de impacto executados.

De facto, verifica-se que alguns dos maiores valores encontrados e que geralmente excedem uma vez e meia a deflexão média, se sobrepõe a estes locais onde o ritmo do disfarce de sobreelevação é lento. Isto indica-nos que os problemas causados pela presença de água da chuva infiltrada transcendem os riscos de hidroplanagem, tendo ao longo originado percolações em profundidade com eventual arraste de finos dos materiais, que constituía as fundações e os aterros pré-existentes. Estes problemas (estruturais) foram estudados no capítulo anterior.

5

CONCLUSÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vias de comunicação rodoviárias são infra-estruturas de transporte indispensáveis para o desenvolvimento socioeconómico de qualquer país, porque asseguram um intercâmbio de pessoas e de mercadorias, de forma rápida, eficaz e segura, entre várias zonas. É essencial que estas infra-estruturas manifestem um nível elevado de qualidade que permita satisfazer os utentes, garantindo condições de segurança, conforto, economia e qualidade ambiental. O conhecimento do estado dos pavimentos ao longo da sua vida útil é fundamental para se atingirem os objectivos enunciados.

É frequente classificar os pavimentos rodoviários de acordo com três categorias principais: rígidos, semirígidos e flexíveis, sendo estes últimos os mais representativos em Portugal. A constituição de cada um dos três tipos de pavimentos implica comportamentos estruturais diferentes, devido à existência de camadas com características distintas, o que se traduz na desigual degradação das cargas em profundidade.

Os pavimentos são estruturas que evoluem de estado com a acção de vários factores. Esta evolução pode traduzir-se no aparecimento de patologias ou degradações que são características de cada tipo de pavimento, devido às diferenças de materiais constituintes referidas anteriormente. As degradações podem estar associadas com a perda de capacidade de suporte da estrutura e/ou com a perda das características funcionais do pavimento.

As características estruturais de um pavimento estão relacionadas com a capacidade de suporte das cargas para que foi projectado, enquanto as características funcionais estão relacionadas essencialmente com a regularidade longitudinal e transversal, a drenabilidade, o ruído, o atrito e a textura. Estas características estão relacionadas entre si, na medida em que a textura condiciona o nível de ruído e a mobilização de atrito e, por sua vez, é influenciada pelas condições de drenabilidade.

A obtenção de níveis adequados destas características é indispensável não só para satisfazer as exigências dos utentes a curto prazo mas também para assegurar a manutenção destas características a partir de operações de monitorização periódicas. Importa referir que a degradação de algumas destas características num pavimento rodoviário pode ter consequências muito graves, nomeadamente no que se refere à ocorrência de acidentes de viação.

A água exerce sobre o pavimento uma acção erosiva, sendo muitas vezes a causa principal ou secundária, da maior parte dos insucessos e interrupções das estradas.

Por ser um factor agressivo para o pavimento, procuram-se as melhores soluções possíveis para os problemas que a água possa vir a causar. De facto, o projecto de drenagem recebe um carácter vital

para a construção rodoviária. A drenagem das águas superficiais representa, acima de tudo, um factor de segurança de circulação.

Como se concluiu no capítulo 2, a presença de água nos pavimentos pode originar a perda de aderência dos veículos e dar lugar ao fenómeno de aquaplanagem.

No capítulo 3 estudaram-se métodos de combate às águas superficiais, tais como a utilização de pavimentos drenantes ou a transição de sobreelevações recorrendo a disfarces parabólicos de 3º grau.

Sobre os pavimentos drenantes concluiu-se que a sua utilização se torna aceitável em auto-estradas, pois as desvantagens relacionadas com a colmatação de vazios não se verificam, apresentando neste caso mais vantagens do que desvantagens. Concluiu-se ainda que estes são inviáveis em meios urbanos uma vez que perdem a sua funcionalidade a curto prazo.

No que respeita às sobreelevações concluiu-se que é essencial fixar valores mínimos para a inclinação secundária, pois valores muito baixos podem conduzir a situações de aquaplanagem. Para evitar situações críticas vizinhas da aquaplanagem, a limitação inferior de δ não se justifica para estradas de duas vias, uma vez que o risco de hidroplanagem para esta situação é desprezável; para estradas de vias múltiplas (vias separadas) verificou-se que esta limitação inferior é indispensável uma vez que, o risco de aquaplanagem aumenta à medida que diminui a inclinação do perfil longitudinal associada à curva de transição a dimensionar.

Verificou-se ainda que, para estradas de duas vias o modelo de disfarce a adoptar deve ser um modelo linear, e para estradas de vias múltiplas o modelo devia ser de disfarce parabólico de 3º grau para a faixa de extradorso e linear para a faixa de intradorso.

No capítulo 4 foram abordadas as diversas patologias das três famílias de pavimentos. Concluiu-se que algumas degradações têm como origem as águas superficiais sobre o pavimento, e que outras, não têm esta como causa, mas a sua presença influencia negativamente a capacidade de suporte dos pavimentos, levando-os a uma ruína prematura.

A conclusão primordial desta dissertação foi que a drenagem deficiente acarreta vários problemas aos pavimentos, pelo que se torna essencial no Projecto de Execução de uma estrada, englobar estudos sobre drenagem e estimar alguns métodos de combate às águas superficiais quando exista necessidade.

5.2. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA

Uma análise futura, poderia incluir a avaliação das características estruturais e funcionais dos pavimentos recorrendo a procedimentos nos quais se inserem diversos equipamentos de auscultação. Os resultados obtidos permitem avaliar o estado dos pavimentos e, a partir dos sistemas de gestão da rede rodoviária é possível determinar posteriormente quando, onde e como se deve intervir.

BIBLIOGRAFIA

Antunes, M. L. (2005). *Modelação do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis*, LNEC, Programa de Investigação e Programa de Pós-Graduação, Lisboa.

Aps, M.& Bernucci, L. L. B. (2004). *Medidas de macro e microtextura e valores de aderência em revestimentos asfálticos visando a segurança viária*, Boletim Informativo nº 173, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), Rio de Janeiro, Brasil.

Balkwill, K. J. (2003). *Development of a Comprehensive Method for Modeling Performance of Aircraft Tires Rolling or Breaking on Dry and Precipitation – Contaminated Runways*. Transportation Development Centre. Transport Canada.

Branco, F., Pereira, P. Santos, L.P. (2008). *Pavimentos rodoviários*, Edições Almedina, Coimbra.

Cedergren, Harry R. (1980). *Drenagem dos Pavimentos de Rodovias e Aeródromos*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. e MT - DNER, Rio de Janeiro.

Domingos, P. M. G. (2007). *Reforço de Pavimentos Rígidos: Modelação do Comportamento Estrutural*. Dissertação de Mestrado, Lisboa.

EP-IEP-JAE (2006). *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários*, vol.2 Gestão da Conservação, Gabinete de Gestão da Rede, Estradas de Portugal, Almada.

EP-IEP-JAE (1997). *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis*, 2ª versão, Direcção dos Serviços de Conservação, Almada.

EP-IEP-JAE (1995) *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, JAE 1995, Almada.

Fontul, S.(2006). *Caracterização do estado dos pavimentos: Características superficiais*, Elementos de apoio ao curso Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários, LNEC, Lisboa.

Fontul, S.; Antunes, M.L.; Fortunato, E.; Oliveira, M. (2007a). *Practical application of GPR in transport infrastructure survey*, LNEC, Lisboa.

Fontul, S.; Antunes, M.L.; Fortunato, E.; Oliveira, M. (2007b). *Practical application of GPR in transport infrastructure survey*, International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials, LNEC, Athens, Greece, 20-22 June.

França, A. (1988). *A Comodidade e a Segurança como critérios condicionantes da Geometria de Traçado*. Dissertação de Doutoramento, FEUP.

França, A., Vasconcelos, A. (1991). *Disfarce da sobrelevação em Estradas com separador de largura reduzida*, Porto.

França, A., Vasconcelos, A. (1992). *O Disfarce da sobrelevação em Auto-Estradas de Traçado Convencional*, Porto.

França, A. (1995). Geometria do Traçado. In *Vias de Comunicação I*, p. 1-56, FEUP, Porto.

Freitas, E. F. & Pereira, P. A. A. (2001). *Estado da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis*, Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, nº 11, Guimarães.

Horne, W. B., Dreher, R. C. (1963). *Phenomena of Pneumatic Tire Hydroplaning*. National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Langley Station, Washington.

Horne, W. B., Yager, T. J., Ivey, D. L. (1986). *Recent Studies to Investigate Effects of Tire Footprint Aspect Ratio on Dynamic Hydroplaning Speed*. ASTM STP 929, Philadelphia.

Merighi, J.V., Peres, R., Silva, G.T. (2006). *Influência da Natureza da Superfície de contato na geração de aderência nos pavimentos aeroportuário*, V Jornadas Luso- Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, Recife-PE, V-039.

Michelin, Renato G. (1975). *Drenagem Superficial e Subterrânea de Estradas*, Editora Multilibri Ltda, Porto Alegre.

Pereira, A. L. (1959). *Drenagem de Rodovias e Ferrovias*, Ao Livro Técnico LTDA, Rio de Janeiro.

Pereira, A.C.O. (2003). *Influência da drenagem sub-superficial no desempenho de pavimentos asfálticos*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Pereira, P. & Miranda, V. (1999a). *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*, Universidade do Minho, edição de autor, Braga.

Pereira, P. & Miranda, V. (1999b). *Impactes ambientais da irregularidade dos pavimentos rodoviários*, SIAIS – Simpósio Internacional, Porto.

Pinto, J. I. (2003). *Caracterização superficial de pavimentos rodoviários*, Dissertação de Mestrado, Porto.

Ribeiro, J. Q. (1995). *Análise do comportamento de camadas de desgaste drenantes com materiais graníticos*. Dissertação de Doutoramento, FEUP.

Rodrigues Filho, Oswaldo Sansone (2006). *Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários – Estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas*. Dissertação de Mestrado, ITA, São Paulo.

Santos, L. P. (2007a). *Características Superficiais de Pavimentos*, Grupo de Investigação em Vias de Comunicação, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Santos, L. P. (2007b). *Gestão da Conservação de Pavimentos*, Grupo de Investigação em Vias de Comunicação, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Seeds, S.B., Hicks, R.G. (1991) *Development of drainage coefficients for the 1986 AASHTO guide for design of pavement structures*, Journal of the Transportation Research Record 1307, p. 256-267.

[1] http://bdtd.bce.unb.br/tesesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3333 28/02/2009

[2] <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-01122006-142419/> 05/03/2009

[3] <http://www.autoaftermarketnews.com/produtos.php?cat=21&marca=366#> 08/03/2009

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

[5] Brillet, F., Laganier, R. (1985). *La Piste de Glissance du LCPC à Nantes*. Trois Années d'Utilisation. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, nº135, Jan. – Fev., p. 17-33.

- [6] http://www.proasfalto.com.br/pdf/ProAsfalto_capitulo_09.pdf 13/03/2009
- [7] https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/146673/1/Dissertacao_Teresa_Alves.pdf 14/03/2009
- [8] França, A.(2008). *Curso de Beneficiação e Reabilitação de Estradas*, FEUP, Porto.
- [9]http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/5981/2/Tese_Doutoramento_vfinal%20PARTE_2.pdf 23/03/2009
- [10]http://www.dtt.ufpr.br/Topicos/Arquivos/TAP2008_Avaliacao_Pavimentos-01-Falhas.pdf 23/05/2009
- http://www.planservi.com.br/file.write/arquivos_enviados/drenagempavimentos.pdf 28/02/2009
- http://www.espacodasophia.com.br/colaboradores/joao_paulo_souza_silva_aderencia_pneu-pavimentado_e_as_condicoes_de_seguranca_de_pistas.pdf 02/04/2009
- <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/243873/1/Concepcao%20e%20Dimensionamento%20de%20Pavimentos%20em%20Blocos.pdf> 14/04/2009