
RESUMO

Tendo em vista a obtenção de segurança e conforto na condução, as normas geométricas representam um papel fundamental na homogeneidade de critérios no âmbito do traçado rodoviário.

Um dos elementos essenciais ao traçado de curvas em planta é o seu raio, ao qual está frequentemente associada uma sobrelevação, ou seja, uma inclinação transversal que pretende reduzir a incomodidade provocada nos condutores pela aceleração centrífuga ao circular nas mesmas. Esta última relaciona-se com o coeficiente de atrito transversal que, tal como a sobrelevação, deve ser limitado a um valor inferior ao máximo de segurança, mas que ainda assim não seja tão baixo que leve a que os condutores tendam instintivamente a circular a velocidades excessivamente elevadas. A conjugação destas duas grandezas, sobrelevação e coeficiente de atrito transversal mobilizado, permite avaliar o equilíbrio de um veículo em curva, fixar os raios mínimos a utilizar para cada uma das velocidades base e os valores da sobrelevação a adoptar nas curvas de raio superior ao mínimo.

Por serem demasiado conservativos, os valores apresentados na actual Norma de Traçado para os raios mínimos em planta e respectivas sobrelevações, suscitam por vezes dúvidas e/ou opiniões divergentes entre alguns projectistas. O presente documento sugere valores otimizados para os referidos parâmetros tendo em consideração a função a que os mesmos se propõem (comodidade e segurança rodoviária).

Além da norma portuguesa, são analisadas normas e critérios de aplicação da sobrelevação em três outros países (Espanha, França e EUA) de forma a comparar e justificar as propostas apresentadas.

Os novos valores obtidos para os raios em planta têm por base uma relação parabólica entre a curvatura e a sobrelevação e a curvatura e o coeficiente de atrito mobilizado pelos veículos que, segundo se conclui, é a que melhor se ajusta às condições de segurança e comodidade na circulação.

PALAVRAS – CHAVE

Sobrelevação, velocidade, raio da curva, coeficiente de atrito transversal, comodidade e segurança.

ABSTRACT

In order to obtain safety and driving comfort, the geometrical standards represent a crucial role in homogenizing criteria when designing roadways.

The horizontal curve radius is one of the vital elements for the design of roadways. It is usually associated with a superelevation that is a cross slope that aims to reduce the discomfort caused on drivers by the lateral acceleration. The latter one is related to the side friction factor that like the superelevation should be limited to an amount lower than maximum that guarantees security. This value should not be low enough to lead drivers instinctively to travel at high speeds. The combination of these two parameters, superelevation and side friction factor, are appropriate to evaluate the balance of a vehicle in a curve, determine the minimum radius to use for each design speed and the values of the superelevation that are supposed to be adopted in each curve radius.

The values in the current roadway design standard to radius and minimum superelevation are too conservative and therefore raise questions and sometimes differing points of view among some designers. This document suggests optimized values for the parameters mentioned above taking into account the function that they propose (comfort and roadway safety).

Besides the Portuguese standard, Spanish, French and American standards for applying the superelevation are also analyzed. This allows the comparison and justifies the present proposals.

The new values obtained for the minimum horizontal curve radius are based on a parabolic distribution of superelevation and side friction factor that appears to be the one distribution that best suits the conditions for security and comfort in roadway movement.

KEYWORDS

Superelevation, speed, radius of curvature, side friction factor, comfort and safety.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não poderia ter sido possível sem a ajuda de todos os que, de uma forma ou de outra, me incentivaram, motivaram e acompanharam durante toda a sua elaboração.

Ao Eng. Vaz Pato, o meu obrigado por toda a orientação, conhecimentos e incentivo, que me transmitiu ao longo destes meses, assim como a sua permanente disponibilidade e interesse.

Ao Eng. Teles Fortes pelo empenho demonstrado nas sugestões que trouxe para o desenvolvimento e melhoria desta dissertação.

Ao meu colega e amigo Sérgio Silva, por toda a ajuda prestada, disponibilidade e prontidão.

Ao meu primo David, agradeço a companhia nos muitos dias de trabalho na realização das nossas dissertações e pela ajuda nas traduções.

Ao Miguel pela ajuda nas traduções e por toda a paciência e apoio que me deu durante toda a fase de desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais e irmã, agradeço especialmente pelo permanente estímulo que me deram ao longo de toda a minha vida e a segurança que me transmitem, acreditando sempre em mim.

ÍNDICE DE TEXTO

	PÁG.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objectivos.....	1
1.3. Metodologia.....	1
1.4. Estrutura do Trabalho	2
2. CONCEITOS BASE.....	3
2.1. Geometria de Traçado	3
2.2. Velocidade.....	4
2.2.1. Velocidade Base	4
2.2.2. Velocidade Específica	6
2.2.3. Velocidade de Tráfego	7
2.3. Visibilidade.....	8
2.4. Traçado em Planta	9
3. CURVAS EM PLANTA E SOBREELEVAÇÕES UTILIZADAS EM PORTUGAL	11
3.1. Equilíbrio de um Veículo em Curva	11
3.2. Raios Mínimos.....	15
3.2.1. Raios Mínimos Absolutos (RA)	16
3.2.2. Raios Mínimos Normais (RN).....	17
3.3. Inclinação Transversal	19
3.4. Sobreelevações	19
3.5. Homogeneidade de traçado	21
4. CURVAS EM PLANTA E SOBREELEVAÇÕES UTILIZADAS EM OUTROS PAÍSES	23
4.1. Espanha	23
4.1.1. Conceitos base.....	23
4.1.2. Inclinação Transversal.....	25
4.1.3. Sobreelevação.....	25
4.1.4. Raios em Planta.....	26
4.2. França	28
4.2.1. Conceitos base.....	28
4.2.2. Inclinação Transversal.....	29
4.2.3. Sobreelevação.....	29
4.2.4. Raios em Planta.....	30
4.3. Estados Unidos da América.....	33
4.3.1. Conceitos base.....	33
4.3.2. Inclinação Transversal.....	34
4.3.3. Sobreelevação.....	34
4.3.4. Coeficiente de Atrito Transversal.....	36

4.3.5. Raio Mínimo	40
4.3.6. Métodos de determinação da Sobreelevação e do Coeficiente de Atrito Transversal	42
4.3.7. Arruamentos Urbanos de Baixa Velocidade	46
4.3.8. Estradas Rurais, Auto-estradas, Vias Rápidas Urbanas e Arruamentos Urbanos de Alta Velocidade	48
5. ANÁLISE COMPARATIVA	57
5.1. Análise Comparativa dos Parâmetros em Estudo	57
5.2. Sinistralidade nos Países em Estudo	63
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
7. CONCLUSÕES	75
7.1. Conclusões do Trabalho	75
7.2. Recomendação de Propostas de Estudos Futuros	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 2.1 - Distribuição cumulativa de velocidades (JAE, 1994)	7
Figura 3.1 - Equilíbrio de forças a actuar no veículo numa curva sobreelevada	12
Figura 3.2 - Combinação de Raios Desejável (JAE, 1994)	21
Figura 4.1 - “Ball Bank Indicator” (AASHTO, 2004).....	38
Figura 4.2 - Coeficientes de atrito transversal assumidos em projecto (AASHTO, 2004)	39
Figura 4.3 - Métodos de Distribuição da Sobreelevação e dos Coeficientes de Atrito Transversal (AASHTO, 2004)	45
Figura 4.4 - Procedimento do Método 5 para a distribuição da Sobreelevação (AASHTO, 2004)	48
Figura 5.1 - Distribuição da Sobreelevação e dos Coeficientes de Atrito Transversal no caso da SETRA.....	61
Figura 5.2 - Distribuição da Sobreelevação e dos Coeficientes de Atrito Transversal no caso da JAE	62
Figura 5.3- Número de acidentes rodoviários por milhar de veículos motorizados, 2004 (ENECE)	64
Figura 5.4 - Número de vítimas mortais em acidentes rodoviários por milhão de habitantes, 2004 (ENECE)..	65
Figura 6.1 - Coeficientes de Atrito Transversal em função da velocidade	69
Figura 6.2 - Raios Mínimos em função da velocidade	70
Figura 6.3 - Sobreelevação em função do Raio da Curva para cada uma das Velocidades Base	72

ÍNDICE DE QUADROS

	PÁG.
Quadro 2.1 - Velocidade Base em função do Tipo de Estrada (JAE, 1994).....	5
Quadro 2.2 - Velocidade específica nas curvas (JAE, 1994).....	6
Quadro 2.3 - Velocidade do tráfego nas estradas nacionais (JAE, 1994).....	7
Quadro 2.4 - Velocidade a considerar nos vários elementos do traçado (JAE, 1994).....	8
Quadro 3.1 - Raios mínimos absolutos, acelerações centrífugas totais e não compensadas (JAE, 1994).....	17
Quadro 3.2 - Raios mínimos normais e acelerações centrífugas totais (JAE, 1994).....	18
Quadro 3.3 - Sobreelevação em curva (JAE, 1994).....	20
Quadro 3.4 - Raios mínimos em função da extensão dos alinhamentos rectos (JAE, 1994).....	22
Quadro 4.1 - Classificação das estradas (Norma 3.1-IC Traçado).....	23
Quadro 4.2 - Valores do Coeficiente de Atrito Transversal Mobilizado (Norma 3.1-IC Traçado).....	26
Quadro 4.3 - Relação Velocidade Específica – Raio – Sobreelevação para estradas do Grupo 1 (Norma 3.1-IC Traçado).....	27
Quadro 4.4 - Relação Velocidade Específica – Raio – Sobreelevação para estradas do Grupo 2 (Norma 3.1-IC Traçado).....	27
Quadro 4.5 - Classificação das estradas (SETRA).....	28
Quadro 4.6 - Velocidades V85 e Vregulamentar (SETRA).....	29
Quadro 4.7 - Raios correspondentes ao limite de conforto (ICTAAL).....	30
Quadro 4.8 - Raios correspondentes ao limite de segurança (ICTAAL).....	31
Quadro 4.9 - Raios mínimos a utilizar (ARP/ICTAAL).....	31
Quadro 4.10 - Coeficientes de atrito transversal (ICTAAL).....	31
Quadro 4.11 - Sobreelevações em curva (SETRA).....	32
Quadro 4.12 - Raios Mínimos utilizando os valores máximos de “e” e “f” (AASHTO, 2004).....	41
Quadro 4.13 - Velocidade Média de Circulação (AASHTO, 2004).....	44
Quadro 4.14 - Raio Mínimo e Sobreelevação para Arruamentos Urbanos de Baixa Velocidade (AASHTO, 2004).....	47
Quadro 4.15 - Raio mínimo para um valor de sobreelevação máximo de 4% (AASHTO, 2004).....	52
Quadro 4.16 - Raio mínimo para um valor de sobreelevação máximo de 6% (AASHTO, 2004).....	53
Quadro 4.17 - Raio mínimo para um valor de sobreelevação máximo de 8% (AASHTO, 2004).....	54
Quadro 4.18 - Raio mínimo para um valor de sobreelevação máximo de 10% (AASHTO, 2004).....	55
Quadro 4.19 - Raio mínimo para um valor de sobreelevação máximo de 12% (AASHTO, 2004).....	56
Quadro 5.1 - Quadro Comparativo dos Parâmetros em Estudo.....	57
Quadro 5.2 - Quadro Comparativo das Sobreelevações.....	59
Quadro 6.1- Valores Propostos.....	68
Quadro 6.2 - Resultados do Método de Distribuição Parabólico.....	71
Quadro 6.3 - Valores Propostos para a Sobreelevação em função da Velocidade e dos Raios em Curva.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS
Alfabeto Latino

<i>Símbolo:</i>	<i>Significado:</i>
AR	Alinhamento Recto
a	Distância entre dois pontos
a_n	Aceleração centrífuga total
D_C	Distância de visibilidade de cruzamento
D_D	Distância de visibilidade de decisão
D_P	Distância de visibilidade de paragem
D_U	Distância de visibilidade de ultrapassagem
e_{max}	Sobreelevação máxima
F_c	Força centrífuga
F_r	Força resultante
F_t	Força tangencial
f, f_t	Coefficiente de atrito transversal mobilizado
f_{max}	Coefficiente de atrito transversal máximo
g	Aceleração da gravidade
h	Altura
i	Inclinação
P	Peso
R	Raio
RA	Raio mínimo absoluto
RN	Raio mínimo normal
R_{PI}	Raio no ponto PI
R_{min}	Raio mínimo
Se, e	Sobreelevação
V	Velocidade
V_B	Velocidade base
V_E	Velocidade específica
V_P, V_D	Velocidade de projecto
V_{PL}	Velocidade de planeamento
V_R	Velocidade de circulação
V_T	Velocidade de tráfego
V85	Velocidade correspondente ao percentil 85

Alfabeto Grego

Símbolo: *Significado:*

α	Ângulo entre duas superfícies
ρ	Ângulo

Funções Matemáticas

Símbolo: *Significado:*

$\cos \alpha$	Coseno do ângulo α
$\sin \alpha$	Seno do ângulo α

Siglas

Sigla: *Significado:*

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AE	Auto-Estrada
ARP	Aménagement des Routes Principales
EN	Estrada Nacional
EP	Estradas de Portugal
ER	Estrada Regional
EUA	Estados Unidos da América
IC	Itinerário Complementar
ICTAAL	Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison
IP	Itinerário Principal
JAE	Junta Autónoma de Estradas
PRN	Plano Rodoviário Nacional
SETRA	Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Para projectar uma infra-estrutura rodoviária, entre outros factores, as normas geométricas representam um papel fundamental. Estas procuram que as estradas proporcionem, para além de níveis de segurança e conforto de condução, uma exploração económica dos transportes rodoviários. Contudo, o critério de aplicação de sobreelevações em projectos rodoviários suscita, por vezes, algumas dúvidas entre os projectistas, talvez porque a actual Norma de Traçado utilizada em Portugal apresente algumas incoerências.

O trabalho enquadra-se, portanto, no âmbito do traçado rodoviário, e tem a ver com o binómio raio da curva em planta/sobrelevação, de cuja relação depende o coeficiente de atrito transversal mobilizado pelas viaturas. Este parâmetro está directamente relacionado com as condições de conforto e segurança da circulação.

1.2. Objectivos

O principal objectivo deste trabalho é definir e justificar critérios normativos para a fixação das sobreelevações que melhor se adequem à função a que se propõem (comodidade e segurança rodoviária), tendo em vista a necessária revisão da Norma de Traçado.

O trabalho pretende ser um contributo para colmatar as incoerências que se verificam.

1.3. Metodologia

A metodologia a adoptar compreenderá duas fases distintas, sendo a primeira reservada à pesquisa e análise das normas e dos critérios de aplicação da sobrelevação, quer em Portugal quer noutros países (EUA, Espanha e França).

Numa segunda fase pretende-se identificar e definir com precisão e coerência os critérios normativos que melhor conduzem aos objectivos a atingir.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, sendo o primeiro e o último referentes, respectivamente, à introdução e às conclusões.

O capítulo 2, para além de um enquadramento da situação rodoviária em Portugal, apresenta alguns conceitos base de conhecimento conveniente para melhor percepção da matéria que se segue, relacionados com geometria de traçado, velocidade, visibilidade e traçado em planta.

No capítulo 3 apresenta-se a análise efectuada à norma portuguesa relativamente aos parâmetros em estudo, raios mínimos, sobrelevações e coeficientes de atrito transversal mobilizados, bem como algumas considerações teóricas que levam à adopção desses valores.

No capítulo 4 apresenta-se a análise efectuada às normas aplicadas em outros países, tais como, Espanha, França e EUA. Dado que as normas americanas são as mais actuais e os parâmetros em estudo foram alvo de estudos recentes, a sua análise é um pouco mais exhaustiva.

O capítulo 5 apresenta um resumo dos parâmetros em estudo verificados nas várias normas bem como uma análise comparativa dos mesmos, procurando-se ainda justificar as diferenças obtidas para cada país. Paralelamente, apresenta-se a comparação da sinistralidade ocorrida nos referidos países no ano de referência de 2004.

No capítulo 6 descrevem-se as considerações e apresentam-se os resultados, ou seja, os valores propostos para cada um dos parâmetros em estudo, nomeadamente coeficientes de atrito transversal mobilizado, sobrelevações e raios em planta. Apresenta-se ainda a comparação entre estes valores e os utilizados actualmente em Portugal definidos pela Norma de Traçado P3/94.

2. CONCEITOS BASE

O Plano Rodoviário Nacional (PRN 2000) define a rede rodoviária nacional do continente, que desempenha funções de interesse nacional ou internacional. A rede rodoviária nacional é constituída pela rede nacional fundamental e pela rede nacional complementar.

A rede nacional fundamental integra os Itinerários Principais (IP) que são vias de comunicação de maior interesse nacional, servem de apoio a toda a rede rodoviária nacional e asseguram a ligação entre os centros urbanos com influência supra-distrital e destes com os principais portos, aeroportos e fronteiras.

A rede nacional complementar é formada pelos Itinerários Complementares (IC) e pelas Estradas Nacionais (EN). Os itinerários complementares são as vias que no contexto do plano rodoviário nacional estabelecem as ligações de maior interesse regional, bem como as principais vias envolventes e de acesso nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto.

A rede nacional de Auto-Estradas (AE) é formada pelos elementos da rede rodoviária nacional especificamente projectados e construídos para o tráfego motorizado.

As comunicações públicas rodoviárias do continente com interesse supra municipal e complementar à rede rodoviária nacional são asseguradas por Estradas Regionais (ER).

As estradas não incluídas no plano rodoviário nacional integram as redes municipais.

2.1. Geometria de Traçado

Em Portugal, no projecto de estradas novas e na reconstrução e ampliação de estradas já existentes, aplica-se a Norma de Traçado da ex-JAE (P3/94).

O objectivo desta norma é que o estudo dos projectos seja efectuado segundo critérios uniformes que permitam obter uma rede bem estruturada e facilitem o comportamento correcto dos condutores.

Pretende-se a construção de estradas seguras, que satisfaçam a procura de tráfego, que se integrem no meio ambiente em condições óptimas e cujos custos de construção e conservação sejam aceitáveis.

A geometria de uma estrada fica completamente conhecida se forem conhecidas a directriz (eixo em planta), a rasante (eixo em perfil longitudinal) e os respectivos perfis transversais.

O traçado em planta deve assegurar a circulação com segurança e comodidade. As suas condicionantes principais são a velocidade, as características geotécnicas, a orografia, o meio ambiente e os custos.

A orografia condiciona a velocidade e por sua vez a velocidade influi na distância de visibilidade que também deve ser analisada em conjunto com a primeira.

Segundo a Norma de Traçado (P3/94), são necessárias três condições para que o traçado em planta se possa considerar seguro e cómodo: homogeneidade, compatibilidade entre velocidade base e velocidade de tráfego e a existência de distâncias de visibilidade em função da velocidade de tráfego.

2.2. Velocidade

A actual norma atribui à velocidade o principal e fundamental parâmetro para a escolha e controlo dos elementos geométricos do traçado de uma estrada, sendo que nela se reflectem os critérios de economia, segurança e comodidade.

Face à necessidade de se obter traçados mais homogéneos e estradas mais consistentes, a norma apresenta três conceitos de velocidade: base, específica e de tráfego.

2.2.1. Velocidade Base

É definida como sendo a velocidade máxima que deverá ser assegurada ao longo de todo o traçado (critério de segurança).

Em Portugal, para o estudo e concepção de uma estrada, a velocidade base é a velocidade que é estabelecida em primeiro lugar. A escolha da velocidade base resulta da função da estrada na rede nacional, tendo em consideração as características orográficas, factores ambientais e económicos, os objectivos do tráfego e o nível de serviço.

A velocidade base permite caracterizar a maioria das características geométricas do projecto e, conseqüentemente, coordenar as várias componentes.

O Quadro 2.1, apresentado na norma, refere as velocidades base a considerar na rede nacional:

Quadro 2.1 - Velocidade Base em função do Tipo de Estrada (JAE, 1994)

Tipos de Estrada	Velocidade Base (km/h)				
	140	120	100	80	60
Itinerários Principais	× (a)	× (b)	×	× (c)	
Itinerários Complementares		× (b)	×	×	× (c)
Outras Estradas			×	×	×

(a) Só em auto-estrada

(b) Só em estrada com faixas de rodagem unidireccionais

(c) No caso de estradas com faixas de rodagem unidireccionais deverá ser devidamente justificado o recurso a esta velocidade

De acordo com a norma, a velocidade base permitirá definir a maioria das características geométricas do projecto, tais como, o raio mínimo em planta, a inclinação dos trainéis e o perfil transversal tipo dos Itinerários Principais e Complementares. Nas Outras Estradas, a velocidade base será utilizada para a determinação de todas as características geométricas do traçado.

No sentido de uniformizar e homogeneizar os traçados, a norma refere que a velocidade base deve manter-se constante ao longo das várias secções da estrada. Quando tal não for possível, ou seja, haja necessidade de alteração da velocidade base, esta deve ser feita de forma gradual, limitando-se a variação da velocidade base entre secções sucessivas de estrada a 10 km/h.

2.2.2. Velocidade Específica

É a velocidade máxima que pode ser obtida com segurança em qualquer elemento do traçado, considerado isoladamente. A velocidade específica é também determinada por critérios de segurança, mas para cada elemento geométrico individualmente considerado, permitindo assim uma análise dinâmica do traçado por comparação dos seus valores em elementos consecutivos.

A norma regulamenta a construção de um diagrama de velocidades específicas que pretende representar a variação gráfica desta velocidade ao longo do traçado, conseguindo-se através da sua visualização uma análise das velocidades entre elementos geométricos sucessivos e, conseqüentemente, ter-se um parâmetro de avaliação de homogeneidade do traçado.

Os valores da velocidade específica em curva definidos pela norma são os apresentados no Quadro 2.2:

Quadro 2.2 - Velocidade específica nas curvas (JAE, 1994)

Estrada com 2 vias		Estrada com 2 x 2 vias	
Raio (m)	Velocidade Específica (km/h)	Raio (m)	Velocidade Específica (km/h)
180	70	-	-
210	75	-	-
240	80	-	-
280	85	-	-
320	90	320	90
370	95	370	95
420	100	420	100
470	105	470	105
530	110	530	110
580	115	580	115
≥ 620	120	620	120
-	-	710	125
-	-	≥ 780	130

2.2.3. Velocidade de Tráfego

É a velocidade que é excedida numa estrada ou troço de estrada por somente 15% dos veículos. Esta velocidade é mais representativa das condições reais de circulação, pois é aquela que 85% dos condutores adoptarão tendo em conta o traçado e o seu meio envolvente. A Figura 2.1 apresenta a distribuição cumulativa de velocidades para cada tipo de estrada.

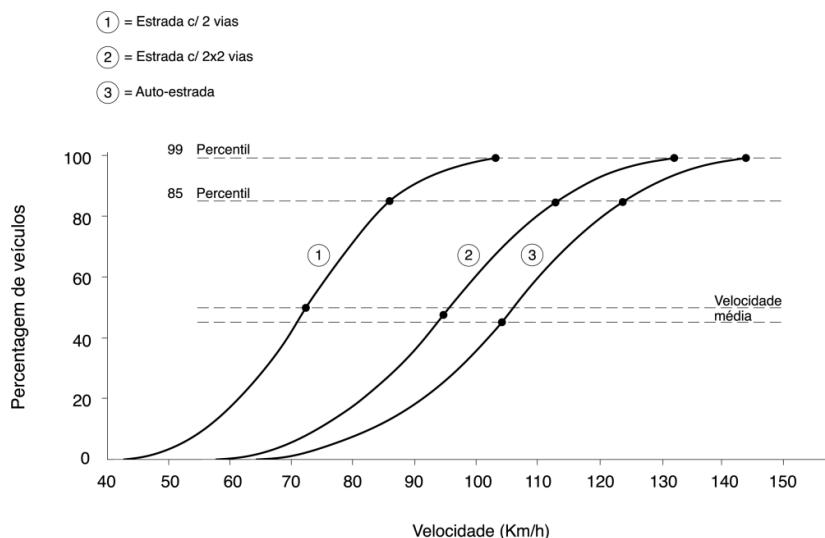


Figura 2.1 - Distribuição cumulativa de velocidades (JAE, 1994)

A velocidade correspondente ao 85 percentil é considerada como uma velocidade crítica em termos de segurança de circulação, pois verificou-se que as velocidades superiores a esta são normalmente perigosas para as condições existentes.

A velocidade de tráfego referida na norma, a considerar em cada caso, encontra-se no Quadro 2.3:

Quadro 2.3 - Velocidade do tráfego nas estradas nacionais (JAE, 1994)

Velocidade Base V_B (km/h)	Velocidade de Tráfego V_T (km/h)
60	80
80	100
100	120
120	130
140	140

Segundo a norma, na definição das características geométricas de uma estrada, há que considerar não só a velocidade base como a velocidade de tráfego, pois a velocidade dos utentes ao longo do percurso varia em função das características do traçado.

No Quadro 2.4 refere-se a velocidade a considerar na definição das características geométricas:

Quadro 2.4 - Velocidade a considerar nos vários elementos do traçado (JAE, 1994)

Elementos do Traçado	Velocidade	
	Velocidade base	Velocidade do Tráfego (a)
Raio mínimo em planta	×	-
Trainel máximo	×	-
Perfil transversal tipo	×	-
Distâncias de visibilidade	-	×
Raio mínimo das concordâncias verticais	-	×

(a) Esta velocidade só será considerada nos IPs e ICs

2.3. Visibilidade

A visibilidade numa estrada, entendida como a extensão continua de estrada visível pelo condutor, é um dos parâmetros fundamentais em termos de segurança de circulação. Há que assegurar que a distância de visibilidade seja suficiente para que os condutores possam controlar a velocidade dos seus veículos perante a existência de qualquer impedimento ou obstáculo na estrada.

Em termos de distância de visibilidade, a norma P3/94 estabelece três tipos: paragem, decisão e ultrapassagem.

2.4. Traçado em Planta

Os diferentes elementos geométricos do traçado em planta são: alinhamentos rectos, curvas circulares e curvas de transição.

O desenvolvimento do presente trabalho irá recair no estudo das curvas circulares bem como na sobrelevação associada a aplicar em secção corrente numa estrada.

3. CURVAS EM PLANTA E SOBREELEVAÇÕES UTILIZADAS EM PORTUGAL

As curvas circulares, no traçado em planta, são elementos que permitem a adaptação da estrada à topografia do terreno e a harmonização e equilíbrio com a paisagem e os terrenos confinantes.

3.1. Equilíbrio de um Veículo em Curva

Para que um veículo possa percorrer uma curva circular em segurança, é necessário que o raio desta não seja inferior a determinado limite, fixado através da relação de equilíbrio entre as principais forças envolvidas no movimento circular do veículo (Lamm et al., 1999). O estudo do equilíbrio destas forças pode também ser utilizado para o cálculo da velocidade limite a que um veículo pode circular em curva.

Quando um veículo de peso P (N), descreve uma curva de raio R (m), a uma velocidade V (m/s), fica sujeito a uma aceleração normal (centrífuga) n_a de valor V^2 / R com direcção horizontal, originando uma força centrífuga F_c no sentido do extradorso da curva, de valor:

$$F_c = \frac{P}{g} \times \frac{V^2}{R} \quad (3.1)$$

Em que:

P - peso do veículo [N];

g - aceleração da gravidade [m/s²];

$\frac{V^2}{R}$ - aceleração centrífuga [m/s²].

Observando-se a Figura 3.1 de um veículo a descrever uma curva à direita poderão analisar-se as forças que actuam no veículo. A força centrífuga tende a desviar o veículo para fora da estrada (situação de deslizamento), ou mesmo fazê-lo capotar (situação de derrubamento) rodando em torno dos rodados mais próximos do extradorso da curva. Opõe-se a estas tendências a força F_t , resultante do atrito existente entre o pneu e o pavimento e uma componente de peso (Lamm et al., 1999). Com o objectivo de diminuir o risco de deslizamento, as curvas são sobreelevadas, ou seja, a faixa de rodagem é inclinada na direcção do centro de curvatura com um ângulo α .

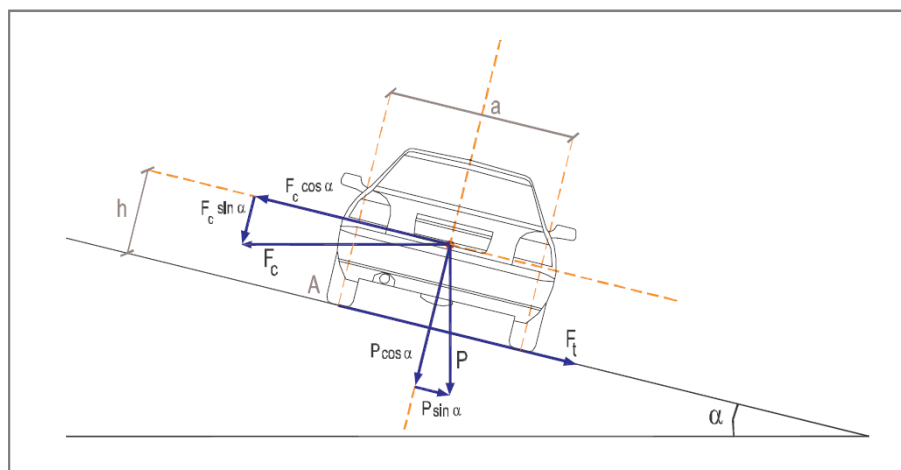


Figura 3.1 - Equilíbrio de forças a actuar no veículo numa curva sobreelevada

As forças e distâncias a considerar nesta situação são:

P - peso do veículo [N];

F_c - força centrífuga correspondente ao peso do veículo [N];

F_t - força tangencial resistente provocada pelo contacto pneu/pavimento [N];

a - distância entre rodados no mesmo eixo [m];

h - altura do centro de gravidade em relação ao pavimento [m].

Para evitar a situação de deslizamento é necessário que a soma vectorial das forças paralelas à plataforma da estrada que solicitam o veículo, seja inferior ou igual à aderência máxima que é possível mobilizar no contacto entre o pneu e o pavimento, sendo F_t o valor limite do atrito disponível no sentido transversal, dada pela diferença vectorial entre o atrito total e aquela que é utilizada na direcção longitudinal.

Nesta situação, para assegurar que a força centrífuga não provoque o deslizamento do veículo, é necessário estudar o equilíbrio transversal (à translação), paralelamente à plataforma e normal ao eixo da estrada.

Sendo f_t o coeficiente de atrito transversal, o valor limite de F_t é dado por $F_r \times f_t$, em que F_r é a resultante das forças que actuam na direcção normal à plataforma da estrada.

A situação de deslizamento é evitada se:

$$F_c \cos \alpha \leq P \sin \alpha + f_t(P \cos \alpha + F_c \sin \alpha) \quad (3.2)$$

Substituindo na expressão anterior o valor de F_c dado por (3.1) e dividindo ambos os membros por $\cos \alpha$, fica:

$$\frac{V^2}{gR} \leq \tan \alpha + f_t + \frac{V^2}{gR} \tan \alpha \cdot f_t \quad (3.3)$$

Dado que $\tan \alpha \cdot f_t$ assume valores muito baixos podemos desprezar a parcela $\frac{V^2}{gR} \tan \alpha \cdot f_t$ e designando a sobrelevação por Se sendo esta igual a $\tan \alpha$ temos que:

$$\frac{V^2}{R} \leq g (Se + f_t) \quad (3.4)$$

Sendo g uma constante de valor $9,81 \text{ m/s}^2$ e exprimindo a velocidade em km/h , vem:

$$R \geq \frac{V^2}{127 (Se + f_t)} \quad (3.5)$$

A expressão geral (3.5) traduz assim o valor do raio mínimo de uma curva circular, de modo a que não ocorra deslizamento dum veículo circulando à velocidade V , num pavimento com sobrelevação Se e coeficiente de aderência f_t .

É de referir que a expressão anterior é determinada baseando-se apenas no alinhamento horizontal e no perfil transversal (sobrelevação) da estrada, não sendo considerado o perfil longitudinal. Se se considerar a combinação do alinhamento horizontal com o alinhamento vertical, a margem de segurança pode diminuir, pois esta expressão corresponde à situação limite de deslizamento. Sousa Melo (1978) estudou a capotagem em acidentes de uma só viatura e envolvendo duas viaturas. Nesse estudo refere que a capotagem só com uma

viatura pode ser originária por aumento súbito da aderência transversal ou por excesso da força centrífuga (viragem brusca ou excesso de velocidade).

Para evitar a situação de derrubamento é necessário que o momento das forças que tendem a derrubar o veículo, em relação às rodas do lado exterior (ponto A na Figura 3.1), seja inferior ou no limite igual ao momento das forças que tendem a estabilizá-lo, ou seja:

$$F_c \cos \alpha \cdot h \leq P \cos \alpha \cdot \frac{a}{2} + P \sin \alpha \cdot h + F_c \sin \alpha \cdot \frac{a}{2} \quad (3.6)$$

$$\frac{m \cdot V^2}{R} (\cos \alpha \cdot h - \sin \alpha \cdot h) \leq m \cdot g (\cos \alpha \cdot \frac{a}{2} + \sin \alpha \cdot h) \quad (3.7)$$

Dividindo ambos os membros por $m \cdot g \cdot \cos \alpha$, temos:

$$\frac{V^2}{g \cdot R} \left(h - \tan \alpha \cdot \frac{a}{2} \right) \leq \frac{a}{2} + \tan \alpha \cdot h \quad (3.8)$$

Sendo g uma constante de valor $9,81 \text{ m/s}^2$ e exprimindo a velocidade em km/h , fica:

$$R \geq \frac{V^2(2 \cdot h - Se \cdot a)}{127(2 \cdot h \cdot Se + a)} \quad (3.9)$$

A expressão geral (3.9) traduz o valor de raio mínimo de uma curva circular, de modo a que não haja derrubamento dum veículo circulando à velocidade (V) numa faixa de rodagem com sobrelevação (Se).

Sousa Melo (1978) estudou o fenómeno de capotagem utilizando um modelo mais complexo, considerando o efeito das molas e amortecedores constituintes da suspensão, mas concluiu que a diferença de valores para as velocidades críticas para a capotagem é na ordem dos 10%.

Dado que para os veículos actuais os valores de “ a ” e “ h ” são projectados de modo a que a estabilidade seja assegurada em condições muito adversas, pode afirmar-se que em

condições de instabilidade, um veículo desliza antes de capotar. No caso dos veículos pesados, que apresentam piores relações de “a” e “h”, as velocidades a que circulam são mais baixas.

Assim, as normas de projecto utilizam a equação (3.5) para estabelecer os raios mínimos a adoptar nas diferentes condições, dotada de uma margem de segurança que provém da adopção de apenas uma parte do valor admissível do coeficiente de atrito transversal.

3.2. Raios Mínimos

Com o objectivo de proporcionar comodidade e segurança ao utente de um veículo que se desloque numa curva circular, os raios mínimos das curvas que derivem da atribuição de “Se” e “f_t” devem limitar-se a valores tais que originem níveis de conforto e segurança aceitáveis para a maior parte dos condutores.

Em relação ao equilíbrio do veículo em curva, importa referir que a acção da força centrífuga é contrabalançada pelo condutor de modo ao veículo poder inserir-se na curva, sendo no entanto esse esforço reduzido pela introdução da sobrelevação. Desta forma, o esforço do condutor é despendido no sentido da mobilização do atrito transversal necessário para manter o veículo inserido na curva.

Assim, o esforço na realidade despendido pelo condutor, ou seja, a incomodidade realmente sentida pelo condutor, corresponde à força centrífuga não compensada pela sobrelevação, que é realmente mobilizada reactivamente no contacto pneu/pavimento.

Partindo da expressão (3.4), pode dizer-se que, no limite:

$$\frac{V^2}{R} - g \cdot Se = g \cdot f_t \quad (3.10)$$

Ou seja, a aceleração centrífuga não compensada pela sobrelevação é igual ao produto da aceleração da gravidade pelo coeficiente de atrito transversal.

As curvas em planta não são projectadas utilizando o máximo valor disponível para o atrito, ou seja, o limite a partir do qual o veículo começa a deslizar. O máximo valor para o coeficiente de atrito transversal deve ser uma parte do máximo disponível que pode assegurar conforto e segurança na circulação para a maior parte dos condutores. Este valor

depende de vários factores, tais como a velocidade do veículo, o tipo e a condição do pavimento e dos pneumáticos e as condições atmosféricas.

A norma P3/94 não refere explicitamente os valores adoptados para o coeficiente de atrito transversal mas estes estão referidos na Norma anterior P3/78 ou podem ser calculados com base nos raios mínimos apresentados na norma actual.

Correspondendo a dois níveis de comodidade, a Norma estabelece para as curvas circulares dois tipos de raios mínimos, os absolutos (RA) e os normais (RN).

3.2.1. Raios Mínimos Absolutos (RA)

Os raios mínimos absolutos são expressos em função da velocidade base e devem ser aplicados somente em situações excepcionais, dado que originam níveis elevados de incomodidade próximos dos valores máximos admissíveis. A norma refere que o valor máximo admissível para a aceleração centrífuga total, ou seja, a aceleração centrífuga considerando a inexistência do efeito benéfico da sobrelevação, é de 0,22g.

O Quadro 3.1 apresenta os raios mínimos absolutos bem como os valores máximos calculados para o coeficiente de atrito transversal, a aceleração centrífuga total e a aceleração centrífuga não compensada pela sobrelevação.

O cálculo da aceleração centrífuga não compensada exige o conhecimento do valor da sobrelevação, que a norma P3/94 limita em 7% de forma a evitar a possibilidade de derrapagem para o interior da curva por parte dos veículos mais lentos em condições climáticas desfavoráveis.

Importa referir que, segundo a norma, o coeficiente de atrito entre os pneus e um pavimento com gelo é cerca de 0,1, o que significa que nestas condições, um veículo parado ou que se desloque lentamente, tem tendência a deslizar para o centro da curva quando a sobrelevação for da ordem dos 10%.

Quadro 3.1 - Raios mínimos absolutos, acelerações centrífugas totais e não compensadas (JAE, 1994)

V_B (km/h)	f_t	Se (%)	$RA_{\text{adoptados}}$ (m)	a_n (m/s ²)	$\frac{V_B^2}{3,6^2 \cdot R} - g \cdot Se = g \cdot f_t$
40	0,159	7	55	2,24	1,56
50	0,162	7	85	2,27	1,58
60	0,148	7	130	2,14	1,45
70	0,144	7	180	2,10	1,41
80	0,140	7	240	2,06	1,37
90	0,129	7	320	1,95	1,27
100	0,117	7	420	1,84	1,15
110	0,100	7	560	1,67	0,98
120	0,092	7	700	1,59	0,90
130	0,078	7	900	1,45	0,76
140	0,059	7	1200	1,26	0,57

Da análise do Quadro 3.1 pode concluir-se que os valores das acelerações centrífugas totais (a_n) são muito próximas do máximo admissível (2,2 m/s²) referido na norma para velocidades inferiores a 80 km/h.

Relativamente aos valores da aceleração centrífuga não compensada pela sobrelevação, verifica-se que os valores são significativamente inferiores aos 2,2 m/s².

3.2.2. Raios Mínimos Normais (RN)

Com o objectivo de assegurar uma circulação em melhores condições de segurança e comodidade do que os proporcionados com os raios mínimos absolutos a norma P3/94 recomenda a utilização dos raios mínimos normais (RN) expressos em função da velocidade base.

A norma estabelece que a aceleração centrífuga deverá ter um valor correspondente a 50% do valor máximo admissível, ou seja 0,11g.

Desta forma, a partir da expressão (3.4) obtemos:

$$\frac{V_B^2}{R} \leq 0,11g \quad (3.11)$$

Expressando a velocidade em km/h, fica:

$$RN = \frac{V_B^2}{3,6^2 \cdot 0,11g} \quad (3.12)$$

Em que:

RN - raio mínimo normal [m];

g - aceleração da gravidade [m/s^2];

V_B - velocidade base [km/h]

Para os diferentes valores da velocidade base e utilizando a expressão (3.12), obtêm-se, depois de arredondados, os valores preconizados pela norma P3/94.

Estes valores, bem como a aceleração centrífuga total, são apresentados no Quadro 3.2 que se segue:

Quadro 3.2 - Raios mínimos normais e acelerações centrífugas totais (JAE, 1994)

V_B (km/h)	RN cálculo (m)	RN adotados (m)	a_c (m/s^2)
40	114	110	1,12
50	179	180	1,07
60	257	250	1,11
70	350	350	1,08
80	458	450	1,10
90	579	550	1,14
100	715	700	1,10
110	865	850	1,10
120	1030	1000	1,11
130	1208	1200	1,09
140	1401	1400	1,08

Analisando o Quadro 3.2, observa-se que os valores da aceleração centrífuga total são muito próximos de metade do máximo admissível ($1,1 m/s^2$) e a diferença deve-se somente ao arredondamento do valor do raio normal de cálculo.

3.3. Inclinação Transversal

Nos alinhamentos rectos a inclinação transversal da estrada deve-se exclusivamente à drenagem de águas pluviais.

De acordo com a norma, essa inclinação deverá ser de 2,5% nos pavimentos betuminosos e 2% nos pavimentos em betão de cimento.

Nas estradas com duas vias o pavimento é inclinado para ambos os lados a partir do eixo. Nas estradas unidireccionais, o pavimento de cada faixa de rodagem será inclinado para o exterior. Em estradas com dupla faixa de rodagem, em que a largura do separador seja igual ou superior a 13,5 m, a faixa de rodagem pode ser inclinada para ambos os lados. No caso de faixas de rodagem com três vias, é conveniente inclinar duas vias para o exterior e uma para o separador.

3.4. Sobreelevações

Como já referido anteriormente, a sobreelevação das curvas contribui decisivamente para a segurança e comodidade da circulação, pois compensa parte da força centrífuga, favorece a percepção das curvas e conseqüentemente a orientação óptica.

De acordo com a norma P3/94, a sobreelevação deve ser independente da velocidade base, pois os condutores circulam normalmente a velocidades que julgam compatíveis com as curvas e são superiores à velocidade base.

Assim sendo, a sobreelevação é definida de acordo com a velocidade específica compatível com o raio da curva.

No entanto, é necessário garantir que a inclinação máxima da plataforma (resultante da sobreelevação e da inclinação longitudinal da estrada) não seja superior a 10%, dado que para esta inclinação e em presença de gelo, um veículo parado ou que se desloque lentamente, tem tendência a deslizar para o centro da curva. No caso de isto suceder, não deve diminuir-se o valor da sobreelevação mas sim a inclinação do trainel ou eventualmente modificar o traçado em planta.

Os valores de sobrelevação indicados pela norma constam no Quadro 3.3 que se apresenta em seguida:

Quadro 3.3 - Sobrelevação em curva (JAE, 1994)

Estradas com 2 Vias		Estradas com 2x2 Vias	
Raio (m)	Sobrelevação (%)	Raio (m)	Sobrelevação (%)
≤ 450	7,0	≤ 900	7,0
525	6,5	1100	6,5
600	6,0	1300	6,0
700	5,5	1500	5,5
850	5,0	1750	5,0
1000	4,5	2000	4,5
1200	4,0	2250	4,0
1400	3,5	2600	3,5
1600	3,0	3000	3,0
1900 ≤ R < 2500	2,5	3500 ≤ R < 5000	2,5
≥ 2500	-	≥ 5000	-

Curvas em que a incomodidade, devida à aceleração centrífuga, não corresponda a níveis que obriguem o condutor instintivamente a reduzir a velocidade, não necessitam sobrelevação. O tráfego que percorre uma curva à direita desfruta de alguma sobrelevação provida da inclinação transversal normal. O tráfego que percorre uma curva à esquerda fica sujeito a uma sobrelevação negativa resultante da inclinação transversal normal, mas em curvas de raio muito elevado, o coeficiente de atrito transversal necessário para equilibrar a aceleração lateral e contrariar a sobrelevação negativa é pequeno.

3.5. Homogeneidade de traçado

Segundo a norma P3/94, a fim de se obter um traçado seguro e homogéneo os raios das curvas devem:

- Ser o maior possível facilitando a visibilidade e a percepção do traçado pelos utentes;
- Correlacionarem-se equilibradamente entre sucessivas curvas circulares, não só por razões de segurança mas também económicas e de protecção do ambiente;
- Relacionarem-se com a extensão dos alinhamentos rectos que os antecedem.

A norma apresenta um diagrama elaborado com base na análise do conforto óptico e dos acidentes que pretende fazer uma combinação de raios sucessivos desejáveis, o qual se reproduz na Figura 3.2.

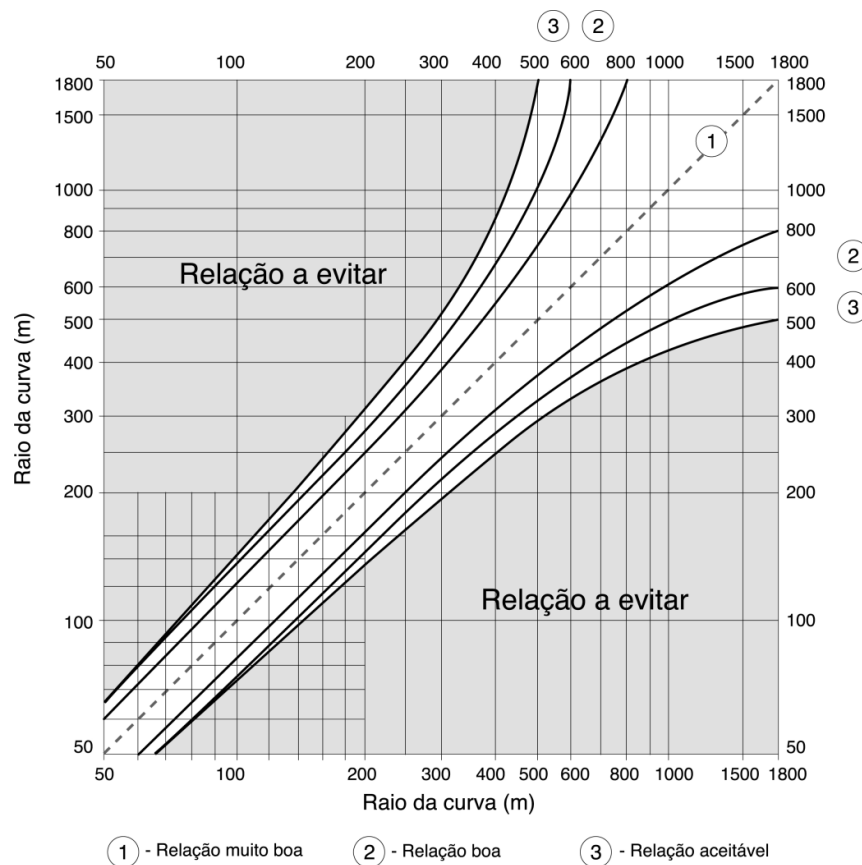


Figura 3.2 - Combinação de Raios Desejável (JAE, 1994)

Segundo a norma, os raios devem tomar os valores constantes no Quadro 3.4, excepto se a velocidade base obrigar a raios superiores.

Quadro 3.4 - Raios mínimos em função da extensão dos alinhamentos rectos (JAE, 1994)

Tipo de Estrada	Extensão do Alinhamento Recto (m)	Raio Mínimo da Curva Circular (m)
IP e IC	$AR \geq 600$	$R > 600$
	$AR < 600$	$R > AR$
Outras Estradas	$AR \geq 500$	$R > 500$

4. CURVAS EM PLANTA E SOBREELEVAÇÕES UTILIZADAS EM OUTROS PAÍSES

Os países escolhidos para análise das normas e dos critérios de aplicação de sobreelevações foram Espanha, França e Estados Unidos da América. A escolha justifica-se pela proximidade de países, no caso de Espanha e França, que resulta em condições climáticas semelhantes e também pelo carácter de continuidade de algumas vias. Os Estados Unidos têm normas bastante recentes apoiadas em estudos estatísticos bastante significativos e que numa primeira fase serviram de base as normas portuguesas.

4.1. Espanha

O estudo ou projecto de um traçado de estrada, em Espanha, deve atender aos elementos básicos especificados na *Norma 3.1-IC Trazado, (Febrero de 2000)*. Nesta norma constam condições relativas a planta, perfil longitudinal, perfil transversal e critérios gerais que devem ser observados para se obter uma coordenação adequada entre os vários elementos.

4.1.1. Conceitos base

Para efeitos de aplicação da referida norma, as estradas denominam-se indicando a classe da estrada, segundo a sua definição legal, seguida da velocidade de projecto expressa em km/h, de acordo com o apresentado no Quadro 4.1:

Quadro 4.1 - Classificação das estradas (Norma 3.1-IC Traçado)

Autopistas	AP-120	AP-100	AP-80		
Autovias	AV-120	AV-100	AV-80		
Vias Rápidas		R-100	R-80		
Estradas convencionais		C-100	C-80	C-60	C-40

A norma estabelece ainda os seguintes grupos:

- Grupo 1: Autopistas, autovias, vias rápidas e estradas C-100;
- Grupo 2: Estradas C-80, C-60 e C-40.

O traçado de uma estrada define-se numa relação directa com a velocidade a que se deseja que circulem os veículos em condições de comodidade e segurança aceitáveis.

Para efeitos de aplicação da Norma 3.1-IC Traçado definem-se as seguintes velocidades:

- Velocidade específica de um elemento de traçado (V_E): Máxima velocidade que pode manter-se ao longo de um elemento de traçado considerado isoladamente, em condições de segurança e comodidade, quando encontrando-se o pavimento húmido e os pneus em bom estado, as condições meteorológicas, do tráfego e legais são tais que não impõem limitações à velocidade;
- Velocidade de projecto de um troço (V_P): Velocidade que permite definir as características geométricas mínimas dos elementos de traçado, em condições de comodidade e segurança. A velocidade de projecto de um troço identifica-se com a velocidade específica mínima do conjunto de elementos que o formam;
- Velocidade de planeamento de um troço (V_{PL}): Média das velocidades específicas dos elementos de traçado em planta de troços homogéneos de extensão superior a dois quilómetros (2 km), dada pela expressão (4.1):

$$V_{PL} = \frac{\sum l_k}{\sum \left(\frac{l_k}{V_{ek}} \right)} \quad (4.1)$$

Em que:

l_k - extensão do elemento k;

V_{ek} - velocidade específica do elemento k

A velocidade de planeamento serve para comparar com a velocidade de projecto e com as velocidades de planeamento dos troços adjacentes para verificar a homogeneidade da geometria do troço.

4.1.2. Inclinação Transversal

A inclinação transversal da plataforma deve ser tal que a evacuação das águas seja fácil e o mais rápido possível.

A Norma 3.1-IC indica que a inclinação da faixa de rodagem deve ter um mínimo de 2%. Em zonas de pluviosidade elevada, pode justificar-se uma inclinação transversal de 2,5%. As bermas devem ter uma inclinação transversal de 4%.

Em curvas circulares e de transição, a pendente transversal da faixa de rodagem coincidirá com a sobrelevação e as bermas manterão uma inclinação transversal de 4%.

Quando a sobrelevação correspondente à curva superar os 4%, a berma do lado interior da curva, terá uma pendente transversal igual à sobrelevação, contudo, a berma do lado exterior da curva, manterá a inclinação transversal de 4%.

4.1.3. Sobrelevação

Para uma certa velocidade de projecto, o raio mínimo a adoptar nas curvas circulares determina-se em função da:

- Sobrelevação e do coeficiente de atrito transversal mobilizado;
- Visibilidade de paragem;
- Coordenação do traçado em planta e perfil longitudinal.

A norma estabelece os valores para a sobrelevação (Se) de acordo com os seguintes critérios:

- Grupo 1 - Autopistas, autovias, vias rápidas e estradas C-100:

$250 < R < 700$	$Se = 8$
$700 < R < 5000$	$Se = 8 - 7,3 (1 - 700/R)^{1,3}$
$5000 < R < 7500$	$Se = 2$
$7500 < R$	Inclinação transversal a duas águas

- Grupo 2 - Estradas C-80, C-60 e C-40:

$50 < R < 350$	$Se = 7$
$350 < R < 2500$	$Se = 7 - 6,08 (1 - 350/R)^{1,3}$
$2500 < R < 3500$	$Se = 2$
$3500 < R$	Inclinação transversal a duas águas

Sendo:

R - raio da curva circular [m]

Se - sobrelevação [%]

4.1.4. Raios em Planta

A velocidade, o raio, a sobrelevação e o coeficiente de atrito transversal mobilizado relacionam-se através da seguinte expressão:

$$V^2 = 127 \times R \times \left(f_t + \frac{Se}{100} \right) \quad (4.2)$$

Sendo:

V - velocidade [km/h];

R - raio da curva circular [m];

f_t - coeficiente atrito transversal mobilizado;

Se - sobrelevação [%]

Para toda a curva circular, com a sobrelevação correspondente ao indicado no ponto anterior, cumpre-se que percorrida a curva circular a uma velocidade igual à específica, os valores do coeficiente de rolamento transversal mobilizado são os indicados no Quadro 4.2:

Quadro 4.2 - Valores do Coeficiente de Atrito Transversal Mobilizado (Norma 3.1-IC Traçado)

V (km/h)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
f_t	0.180	0.166	0.151	0.137	0.122	0.113	0.104	0.096	0.087	0.078	0.069	0.060

Nos Quadros 4.3 e 4.4 inclui-se a relação entre os raios e sobrelevações correspondentes a diferentes velocidades específicas. A utilização sistemática de curvas circulares cuja velocidade específica coincida com a velocidade de projecto justifica-se adequadamente.

Quadro 4.3 - Relação Velocidade Específica – Raio – Sobrelevação para estradas do Grupo 1
(Norma 3.1-IC Traçado)

Velocidade Específica (km/h)	Raio (m)	Sobrelevação (%)
80	250	8
85	300	
90	350	
95	400	
100	450	
105	500	
110	550	
115	600	
120	700	
125	800	
130	900	7.51
135	1050	6.97
140	1250	6.25
145	1475	5.49
150	1725	4.84
		4.29

Quadro 4.4 - Relação Velocidade Específica – Raio – Sobrelevação para estradas do Grupo 2
(Norma 3.1-IC Traçado)

Velocidade Específica (km/h)	Raio (m)	Sobrelevação (%)	
40	50	7	
45	65		
50	85		
55	105		
60	130		
65	155		
70	190		
75	225		
80	265		
85	305		
90	350		
95	410		6.5
100	485		5.85
105	570		5.24
110	670		4.67

4.2. França

O estudo ou projecto de um traçado de estrada, em França, deve atender às instruções publicadas pelo *Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes* (SETRA). Nestes documentos constam elementos relativos a planta, alçado, secção transversal e critérios gerais, que devem ser observados para se obter uma coordenação adequada entre os vários elementos. A ICTAAL fornece instruções técnicas a adoptar nos projectos de auto-estradas enquanto que a ARP se aplica a estradas principais.

4.2.1. Conceitos base

Para efeitos de aplicação das referidas normas, as estradas são denominadas indicando-se o tipo e a categoria da estrada que, no caso das vias rápidas, artérias interurbanas e estradas, está associada à velocidade base, dita de referência, como se apresenta no Quadro 4.5:

Quadro 4.5 - Classificação das estradas (SETRA)

Auto-Estradas	L ₁	L ₂		
Vias - Rápidas		T100	T80	
Artérias Interurbanas e Estradas			R80	R60

As categorias L₁ e L₂ permitem velocidades máximas de 130 km/h e 110 km/h, respectivamente.

Uma das tarefas de um projectista de estradas é encontrar o equilíbrio entre a necessidade de visibilidade e condicionalismos específicos do projecto. Estes requisitos dependem da velocidade praticada, tempo de reacção e distância necessária para a realização de manobras.

Além do limite de velocidade, é necessário saber a velocidade real praticada, daí o conceito de V85: velocidade abaixo da qual 85% dos utentes circulam. Este valor pode ser determinado em estradas já existentes e estimado para os novos projectos, em função do número e características das vias e do mínimo obtido pelo cálculo do raio ou da inclinação da estrada.

São assim apresentadas no Quadro 4.6 as velocidades V85 e Vregulamentar:

Quadro 4.6 - Velocidades V85 e Vregulamentar (SETRA)

Tipo de Via	V85 (km/h)	Vregulamentar (km/h)
Auto-estrada	150	130
2 x 2 vias	120	110
3 ou 2 vias (6 e 7m)	102	90
2 vias (5m)	92	90

No entanto, segundo o SETRA, o dimensionamento das infra-estruturas rodoviárias deve ser feito para as velocidades regulamentares. A velocidade V85 é necessária para o estudo da visibilidade e das respectivas distâncias de paragem e desvio.

4.2.2. Inclinação Transversal

Num alinhamento recto ou numa curva não sobreelevada, a inclinação da estrada deve ser de 2,5 % para o exterior.

4.2.3. Sobrelevação

A sobrelevação ou a inclinação transversal da estrada favorece a evacuação das águas da superfície do pavimento.

Em raios pequenos, ela contribui para o equilíbrio dinâmico dos veículos. No entanto essa contribuição, segundo o SETRA, é limitada ao valor de 7% pois para sobrelevações superiores surgem outras dificuldades, principalmente construtivas.

Este valor deve ainda ser reduzido em alguns casos, tais como as zonas sujeitas à acção de gelo e neve ou onde o perfil longitudinal tem inclinações bastante elevadas.

4.2.4. Raios em Planta

O dimensionamento dos raios em planta de um traçado de estrada depende da dinâmica dos veículos, das condições de contacto pneu/pavimento e do conforto do condutor.

Os parâmetros puramente dinâmicos permitem definir um valor de raio mínimo em função da velocidade praticada e da sobrelevação. O estudo do comportamento do condutor ao percorrer uma curva, por sua vez, permite estimar uma margem adicional de conforto.

Estes cálculos permitem determinar dois valores fundamentais:

- O raio mínimo que assegura a estabilidade do veículo à velocidade de referência, quando associado com a sobrelevação máxima (7%);
- O raio não sobrelevado que assegura a mesma estabilidade na ausência de sobrelevação (perfil transversal a duas águas);

Assim, um limite de estabilidade pode ser determinado a partir de restrições dinâmicas. No entanto, por razões psicológicas, esse limite não é atingido pelos condutores que mantêm instintivamente uma margem de segurança. Estudos demonstram que o limite da segurança pode ser fixado em 2/3 do limite de estabilidade.

Da mesma forma, para o dimensionamento é geralmente considerada uma margem de conforto correspondente à aceleração transversal permitida pelo condutor, pelo que este limite de conforto pode ser definido como 1/2 do limite de estabilidade.

Estas considerações resultam nos raios indicados nos Quadros 4.7 e 4.8, para as diversas velocidades e sobrelevações:

Quadro 4.7 - Raios correspondentes ao limite de conforto (ICTAAL)

Sobreelevação (%)	Velocidade (Km/h)				
	50	70	90	110	130
-2,5%	112	286	580	1024	1662
0%	98	242	473	808	1267
2,5%	87	209	399	666	1023
5%	78	184	345	567	858
7%	73	168	311	507	760

Quadro 4.8 - Raios correspondentes ao limite de segurança (ICTAAL)

Sobreelevação (%)	Velocidade (Km/h)				
	50	70	90	110	130
-2,5%	72	181	362	631	1007
0%	66	162	318	541	848
2,5%	61	146	282	474	731
5%	57	134	254	421	642
7%	54	125	235	387	586

No entanto, as normas aconselham a utilização dos valores indicados no Quadro 4.9:

Quadro 4.9 - Raios mínimos a utilizar (ARP/ICTAAL)

Categoria	R 60	T 80 e R 80	T 100	L ₂	L ₁
Raio mínimo (R _m)	120	240	425	400	600
Raio mínimo não sobreelevado (R _{nd})	600	900	1300	650	1000

São ainda de salientar os valores do coeficiente de atrito transversal considerados no cálculo dos raios, que se apresentam no Quadro 4.10:

Quadro 4.10 - Coeficientes de atrito transversal (ICTAAL)

V (km/h)	50	70	90	110	130
f _t	0.200	0.160	0.135	0.118	0.105

A norma indica que a inclinação transversal de uma estrada varia linearmente em função de $1/R$ entre 2,5 % para o Raio mínimo não sobreelevado (R_{nd}) e 7% para o Raio mínimo (R_m). Os vários valores de sobreelevação a utilizar, de acordo com os raios em planta e a categoria da estrada são apresentados no Quadro 4.11:

Quadro 4.11 - Sobreelevações em curva (SETRA)

Raio (m)	Sobreelevação (%)
R 60	
≤ 120	7
120 - 450	$0,86 + 736,4/R$
450 - 600	2,5
≥ 600	± 2,5 (2 águas)
R 80 ou T 80	
≤ 240	7
240 - 650	$-0,13 + 1712,2/R$
650 - 900	2,5
≥ 900	± 2,5 (2 águas)
T 100	
≤ 425	7
425 - 900	$-1,53 + 3623,7/R$
900 - 1300	2,5
≥ 1300	± 2,5 (2 águas)
L ₂	
≤ 400	7
400 - 475	$-21,5 + 11400/R$
475 - 650	2,5
≥ 650	± 2,5 (2 águas)
L ₁	
≤ 600	7
600 - 750	$-15,5 + 13500/R$
750 - 1000	2,5
≥ 1000	± 2,5 (2 águas)

4.3. Estados Unidos da América

O estudo ou projecto de um traçado de estrada, nos Estados Unidos, deve atender às recomendações constantes nas publicações da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), mais concretamente no manual “A Policy on Geometric Design of Highways and Streets 2004”.

4.3.1. Conceitos base

Para efeitos de aplicação das normas da AASHTO, as estradas americanas são classificadas segundo a sua funcionalidade e localização. Estão assim definidos dois grandes grupos:

- Sistemas Funcionais para Áreas Rurais;
- Sistemas Funcionais em Áreas Urbanizadas.

Estes dois tipos de redes subdividem-se por sua vez em Artérias Principais, Artérias Secundárias, Vias Colectoras e Acessos Locais.

Segundo a AASHTO, a atractividade de uma nova estrada para um condutor é influenciada pelo tempo e dinheiro que poderá poupar e ainda pela comodidade. É por isso o objectivo dos engenheiros projectistas atender às necessidades dos utentes de forma segura e económica.

A velocidade é um dos factores considerados mais importantes para os condutores na escolha de percursos alternativos, pelo que as estradas devem ser concebidas para uma velocidade que satisfaça a maioria dos condutores.

A norma apresenta assim três conceitos de velocidade:

- Velocidade de Operação corresponde à denominada Velocidade de Tráfego na norma portuguesa e é a velocidade a que cada condutor é observado a circular em condições de fluxo livre. O percentil 85 da distribuição de velocidades observadas é a medida mais frequentemente utilizada para a velocidade de operação associada a um determinado local ou característica geométrica.

- Velocidade de Circulação é a velocidade a que cada veículo é observado a circular numa determinada secção de estrada. A média da velocidade de circulação de todos os veículos é o valor mais apropriado para avaliar o nível de serviço e os custos para os utentes da estrada.
- Velocidade de Projecto corresponde à denominada Velocidade Base na norma portuguesa e é a velocidade utilizada para determinar as várias características geométricas da estrada. A velocidade de projecto deve ser escolhida tendo em conta a topografia, antecipando a velocidade de operação.

Em auto-estradas, vias rápidas e artérias em áreas rurais a velocidade de projecto deve ser 110 km/h. Em áreas urbanas, a velocidade de projecto deve situar-se entre 50 a 100 km/h. No entanto, vários aspectos condicionam a escolha da velocidade de projecto e os critérios para essa escolha diferem bastante nos projectos de alta ou baixa velocidade. Devido a estas diferenças, a norma estabelece o limite máximo de 70 km/h para a velocidade de projecto em vias de baixa velocidade e 80 km/h como o limite mínimo em vias de alta velocidade.

4.3.2. Inclinação Transversal

A inclinação transversal normal aplicada nas estradas devido à necessidade de drenagem é estabelecida, segundo a AASHTO, consoante o tipo de estrada e a presença de chuva, neve ou gelo. Este valor, normalmente situa-se entre 1,5% e 2,5%.

4.3.3. Sobreelevação

Como já referido, curvas de raio elevado não necessitam de sobreelevação, contudo em curvas sucessivas à mesma velocidade chega-se a um ponto em que a combinação da aceleração lateral e a sobreelevação negativa supera o atrito transversal admissível, e uma inclinação transversal positiva ao longo da rodovia é desejável para ajudar a sustentar a aceleração lateral. Deste modo é importante definir o raio máximo para o qual é necessária sobreelevação, ou conseqüentemente, o raio mínimo para o qual a inclinação transversal é suficiente.

A limitação da sobrelevação numa curva horizontal dá-se devido a vários factores, tais como, clima, tipo de terreno, utilização do terreno adjacente, e a frequência de veículos lentos. Segundo a AASHTO, a consideração em conjunto destes factores leva à conclusão de que nenhum valor de sobrelevação máximo é universalmente aplicável. No entanto, em regiões de clima e utilização de solos semelhantes é desejável a utilização de um mesmo valor de sobrelevação máximo para conferir homogeneidade aos projectos.

Quando a circulação se realiza a velocidades elevadas, o fenómeno de aquaplanagem parcial pode ocorrer em curvas com drenagem deficiente em que a água se acumula na superfície do pavimento. O escorregamento ocorre normalmente nas rodas traseiras, quando a água no pavimento reduz o atrito transversal.

Quando se viaja lentamente ao longo de uma curva com sobrelevação elevada, desenvolvem-se forças laterais negativas e os veículos mantêm-se na rota adequada apenas porque os condutores os encaminham na direcção contrária à da curva em questão, o que não é natural para o condutor e explica a dificuldade em conduzir em estradas com sobrelevações superiores às necessárias. É, portanto, necessário dar especial atenção às sobrelevações utilizadas em estradas com elevado volume de tráfego, onde poderá ocorrer diminuição de velocidade devido a congestionamentos ou outras situações.

De acordo com a AASHTO, a taxa de sobrelevação mais elevada normalmente utilizada em estradas é 10%, embora se utilize 12% em alguns casos. Taxas de sobrelevação acima dos 8% são usadas apenas em zonas sem neve e gelo. Embora o aumento das taxas de sobrelevação ofereça vantagens para os condutores que circulam a altas velocidades, a prática actual considera que as taxas superiores a 12% estão fora dos limites práticos, seja devido a processos de construção, dificuldades na manutenção ou operação de veículos a baixas velocidades.

Assim, o valor de 12% para a sobrelevação parece representar um valor máximo prático onde, como já se referiu, não exista neve e gelo. Na presença destas condições climatéricas, testes e a experiência demonstram que o valor de 8% é o máximo lógico para minimizar o deslizamento de veículos que estejam parados ou que circulem a velocidades muito baixas.

Uma série de testes (Moyer, 1934) demonstram que os coeficientes de atrito para o gelo variam entre 0,050 e 0,200, dependendo das condições do gelo, e que os coeficientes de atrito da neve variam entre 0,200 e 0,400, dependendo do estado da neve.

O valor mais baixo desta gama de coeficientes de atrito, provavelmente ocorre quando surge no pavimento uma película muito fina de água de congelamento rápido a uma temperatura de cerca de -1°C. Valores similares de baixos coeficientes de atrito podem ocorrer na presença de camadas finas de lama no pavimento, manchas de óleo e velocidades elevadas e uma profundidade de água suficiente na superfície do pavimento para permitir a aquaplanagem. Por estas razões algumas entidades fixam a taxa máxima de sobrelevação em 8%, independentemente da presença de gelo ou neve.

Quando existem congestionamentos de tráfego ou a via impõe restrições à velocidade, é prática comum utilizar um valor máximo de sobrelevação mais baixo, na ordem dos 4% a 6%. Da mesma forma, em zonas de intersecções, rotundas, dispositivos de aviso ou sinais, utiliza-se um valor máximo de sobrelevação baixo ou não se utiliza mesmo sobrelevação.

Em suma, é recomendada a utilização de vários valores máximos de sobrelevação a aplicar nas curvas de uma estrada:

- O valor de 12% não deve ser excedido;
- Os valores 4% ou 6% são aplicáveis em concepção urbana, em áreas com pouca ou nenhuma restrição;
- A sobrelevação pode ser omissa em estradas urbanas de baixa velocidade onde existem muitas restrições.

4.3.4. Coeficiente de Atrito Transversal

O coeficiente de atrito transversal representa a aceleração centrífuga a_f que actua no veículo. Esta aceleração pode ser calculada como o produto entre o coeficiente de atrito transversal (f) e a aceleração da gravidade (g), ou seja:

$$a_f = f \cdot g \quad (4.3)$$

O coeficiente de atrito transversal f é a força de atrito dividida na componente do peso perpendicular à superfície do pavimento e é expressa como uma simplificação da expressão que regulamenta a circulação de um veículo em curva:

$$f = \frac{V^2}{127R} - 0,01e \quad (4.4)$$

Em que:

V - velocidade do veículo [km/h];

R - raio da curva [m];

e - sobrelevação [%]

O limite superior do coeficiente de atrito transversal corresponde ao ponto em que o pneu começa a escorregar e é conhecido como o ponto de derrapagem iminente. Como as curvas são projectadas para evitar derrapagens com uma margem de segurança, os valores de f são substancialmente inferiores ao coeficiente que impede a derrapagem.

O coeficiente de atrito transversal depende de vários factores, entre eles, a velocidade do veículo, o tipo e as condições do pavimento e o tipo e o estado dos pneus.

Em geral, os estudos mostram que o coeficiente de atrito transversal máximo desenvolvido entre pneus novos e pavimento betuminoso molhado varia de cerca de 0,50 a 30 km/h para 0,35 a 100 km/h. Para pavimento betuminoso molhado e pneus lisos, o coeficiente de atrito transversal máximo é cerca de 0,35 a 70 km/h. Em todos os estudos, verificou-se também uma diminuição dos valores do atrito à medida que a velocidade aumenta.

Um critério a considerar na escolha do factor de atrito transversal máximo a utilizar no projecto é o nível de aceleração transversal que é suficiente para causar um desconforto no condutor de modo a que instintivamente evite velocidades elevadas. A velocidade numa curva na qual o desconforto devido a aceleração centrífuga é evidente para os condutores tem sido aceite como valor de referência para o coeficiente de atrito transversal em estradas de alta velocidade e auto-estradas. Para velocidades baixas, os condutores são mais tolerantes ao desconforto o que permite a utilização de valores mais elevados de coeficiente de atrito transversal no cálculo das curvas horizontais.

O “Ball Bank Indicator” foi largamente utilizado como uma medida uniforme para estimar limites para a aceleração normal com o objectivo de determinar velocidades nas curvas para evitar desconforto. O “Ball Bank Indicator” é um sistema composto por uma esfera de aço que está dentro de um tubo de vidro, existindo um líquido no tubo no qual a esfera é livre de rolar em resposta as forças que actuam sobre ela. Com este sistema montado num veículo é possível efectuar leituras em qualquer momento e é indicativo do efeito combinado do ângulo da estrutura do veículo com o pavimento, ângulo de aceleração normal e sobrelevação, conforme se apresenta na Figura 4.1.

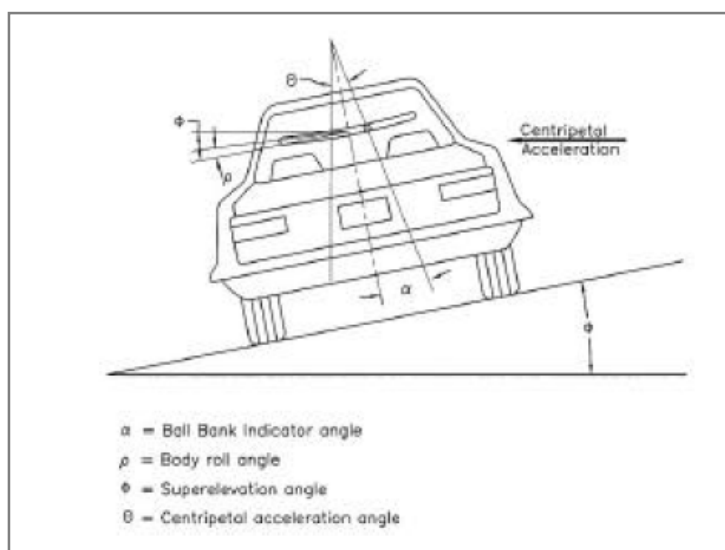


Figura 4.1 - “Ball Bank Indicator” (AASHTO, 2004)

A aceleração centrífuga desenvolvida quando um veículo se desloca a velocidade constante numa curva, faz a esfera deslocar-se para o extradorso da curva. Contudo deve ser feita uma correcção devido ao desvio da estrutura do veículo. A força que os ocupantes estão sujeitos é na ordem de:

$$F \cong \tan(\alpha - \rho) \quad (4.5)$$

A norma refere que, depois de vários estudos (Moyer, 1940), concluiu-se que velocidades que evitem desconforto têm uma relação com os valores registados no “Ball Bank Indicator” de 14° para velocidades iguais ou inferiores a 30 km/h, 12° para

velocidades entre 40 e 50 km/h e 10° para velocidades entre 55 e 80 km/h. A estas leituras correspondem respectivamente 0,21, 0,18 e 0,15 de valores do coeficiente de atrito transversal com uma boa margem de segurança contra o deslizamento.

Outros testes (Barnett, 1936) referem que o valor máximo para o coeficiente de atrito transversal é 0,16 para velocidades superiores a 100 km/h. Para valores de velocidades superiores este valor deve ser inferior, p.e. 0,10 para velocidades superiores a 110 km/h.

A AASHTO indica ainda como alternativa ao “Ball Bank Indicator”, um acelerómetro electrónico para determinação de velocidades em curvas horizontais. Este acelerómetro mede as forças laterais e acelerações que os motoristas sofrem ao percorrer uma curva.

Os coeficientes de atrito transversal variam com a velocidade de 0,40 a 15 km/h até cerca de 0,15 a 70 km/h (velocidades reduzidas) e 0,08 a 130 km/h (velocidades elevadas) conforme representado na Figura 4.2.

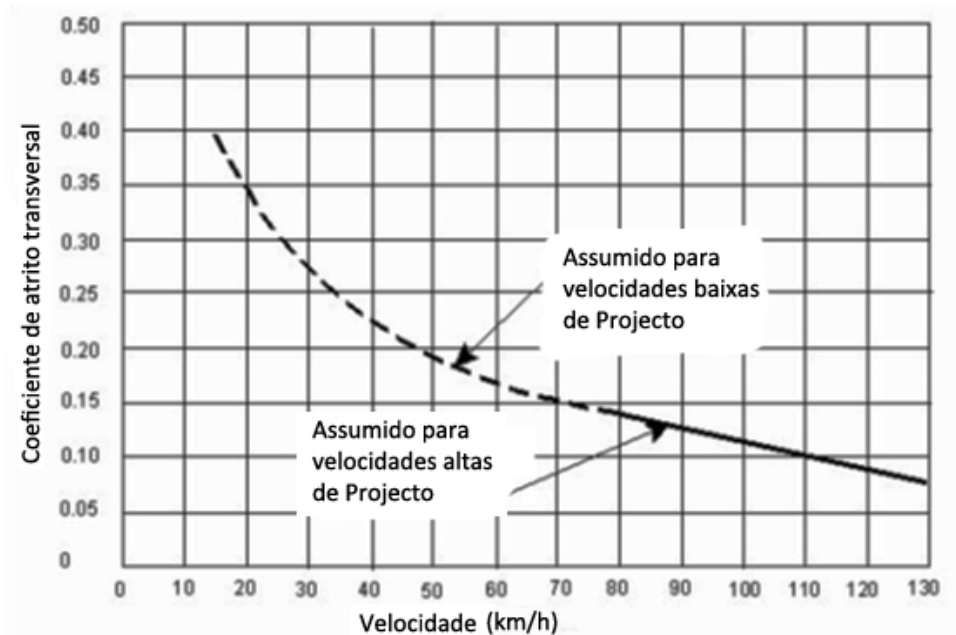


Figura 4.2 - Coeficientes de atrito transversal assumidos em projecto (AASHTO, 2004)

4.3.5. Raio Mínimo

O raio mínimo é um valor limite de curvatura para uma determinada velocidade de projecto e é determinada a partir do valor máximo de sobrelevação e do factor de atrito transversal máximo seleccionados para o projecto. O uso de curvas de raio inferior ao mínimo vai exigir sobrelevações superiores ao limite considerado prático, ou atrito dos pneus e aceleração lateral superiores aos considerados confortáveis para a maioria dos condutores, ou ambos.

O raio mínimo, R_{\min} pode ser calculado directamente da expressão (4.6).

$$R_{\min} = \frac{V_D^2}{127(0,01e_{\max} + f_{\max})} \quad (4.6)$$

Em que:

V_D - velocidade de projecto [km/h]

e_{\max} - sobrelevação máxima [%]

f_{\max} - coeficiente de atrito transversal máximo para a velocidade V [%]

Da qual obtemos os valores apresentados no Quadro 4.12 que se apresenta seguidamente:

Quadro 4.12 - Raios Mínimos utilizando os valores máximos de “e” e “f” (AASHTO, 2004)

Velocidade de projecto V _D (km/h)	Maximum e (%)	Maximum f (%)	Total (0,01e+f)	Raio Calculado (m)	Valor Arredondado (m)
15	4,0	0,40	0,44	4,0	4
20	4,0	0,39	0,43	7,3	8
30	4,0	0,28	0,32	22,1	22
40	4,0	0,23	0,27	46,7	47
50	4,0	0,19	0,23	85,6	86
60	4,0	0,17	0,21	135,0	135
70	4,0	0,15	0,19	203,1	203
80	4,0	0,14	0,18	280,0	280
90	4,0	0,13	0,17	375,2	375
100	4,0	0,12	0,16	492,1	492
15	6,0	0,40	0,46	3,9	4
20	6,0	0,39	0,45	7,0	8
30	6,0	0,28	0,34	20,8	21
40	6,0	0,23	0,29	43,4	43
50	6,0	0,19	0,25	78,7	79
60	6,0	0,17	0,23	123,2	123
70	6,0	0,15	0,21	183,7	184
80	6,0	0,14	0,20	252,0	252
90	6,0	0,13	0,19	335,7	336
100	6,0	0,12	0,18	437,4	437
110	6,0	0,11	0,17	560,4	560
120	6,0	0,09	0,15	755,9	756
130	6,0	0,08	0,14	950,5	951
15	8,0	0,40	0,48	3,7	4
20	8,0	0,39	0,47	6,7	7
30	8,0	0,28	0,36	19,7	20
40	8,0	0,23	0,31	40,6	41
50	8,0	0,19	0,27	72,9	73
60	8,0	0,17	0,25	113,4	113
70	8,0	0,15	0,23	167,8	168
80	8,0	0,14	0,22	229,1	229
90	8,0	0,13	0,21	303,7	304
100	8,0	0,12	0,20	393,7	394
110	8,0	0,11	0,19	501,5	501
120	8,0	0,09	0,17	667,0	667
130	8,0	0,08	0,16	831,7	832
15	10,0	0,40	0,50	3,5	4
20	10,0	0,39	0,49	6,4	7
30	10,0	0,28	0,38	18,6	19
40	10,0	0,23	0,33	38,2	38
50	10,0	0,19	0,29	67,9	68
60	10,0	0,17	0,27	105,0	105
70	10,0	0,15	0,25	154,3	154
80	10,0	0,14	0,24	210,0	210
90	10,0	0,13	0,23	277,3	277
100	10,0	0,12	0,22	357,9	358
110	10,0	0,11	0,21	453,7	454
120	10,0	0,09	0,19	596,8	597
130	10,0	0,08	0,18	739,3	739
15	12,0	0,40	0,52	3,4	3
20	12,0	0,39	0,51	6,2	7
30	12,0	0,28	0,40	17,7	18
40	12,0	0,23	0,35	36,0	36
50	12,0	0,19	0,31	63,5	64
60	12,0	0,17	0,29	97,7	98
70	12,0	0,15	0,27	142,9	143
80	12,0	0,14	0,26	193,8	194
90	12,0	0,13	0,25	255,1	255
100	12,0	0,12	0,24	328,1	328
110	12,0	0,11	0,23	414,2	414
120	12,0	0,09	0,21	539,9	540
130	12,0	0,08	0,20	665,4	665

A AASHTO alerta ainda para o efeito das inclinações verticais (em perfil longitudinal), pois em trainéis relativamente íngremes ou extensos, os condutores tendem a aumentar a velocidade no sentido descendente e a reduzi-la no sentido ascendente. Alguns estudos demonstram que para inclinações superiores a 5% o valor de sobrelevação a aplicar nas curvas deve ser ajustado.

No caso de estradas com faixas de rodagem independentes, ou vias de sentido único, o ajuste pode ser feito directamente, utilizando os valores do Quadro 4.12 e assumindo um ligeiro aumento na velocidade de projecto no sentido descendente e consequentemente, uma ligeira diminuição da velocidade no sentido ascendente.

Em estradas de faixa de rodagem única, o ajuste deve ser feito assumindo um ligeiro aumento da velocidade de projecto para o sentido descendente e aplicando-o em ambos os lados. O consequente aumento de sobrelevação no sentido descendente é benéfico pois ajuda a combater a perda de atrito lateral disponível devido a forças de tracção. No sentido ascendente, a sobrelevação adicional pode causar um atrito lateral negativo nos veículos que circulam a velocidades baixas (pesados). Este efeito é atenuado pela baixa velocidade do veículo, que permite ao condutor manter a orientação correcta.

4.3.6. Métodos de determinação da Sobrelevação e do Coeficiente de Atrito Transversal

Para uma determinada velocidade de projecto, a AASHTO indica cinco métodos para a determinação da sobrelevação e do coeficiente de atrito transversal mobilizado numa curva. Para manter a aceleração centrífuga pode fazer-se variar “e” (sobrelevação) ou “f” (coeficiente de atrito transversal) ou ambos:

- 1. A sobrelevação e o coeficiente de atrito transversal são directamente proporcionais ao inverso do raio;*

Este método é simples, lógico e eficaz, no entanto pressupõe que cada veículo mantenha uma velocidade constante no fluxo de tráfego, independentemente de circular em recta ou curva. Apesar da maior parte dos condutores circularem a velocidades mais ou menos constantes e de tal ser possível em estradas bem concebidas, quando o volume de tráfego não é significativo, existe a tendência de

alguns condutores viajarem mais rápido em recta do que em curva. Esta tendência aponta para a necessidade de se considerarem sobrelevações em curva superiores às resultantes do uso deste método.

- 2. O coeficiente de atrito transversal é tal que num veículo viajando à velocidade de projecto, toda a aceleração lateral é suportada pelo atrito até um raio de curvatura que corresponde ao coeficiente de atrito transversal máximo. Para curvas mais acentuadas “f” é igual a f_{max} e a sobrelevação é então utilizada para sustentar a aceleração centrífuga até “e” atingir e_{max} . Neste método, primeiro “f” e depois “e” são aumentados na proporção inversa ao raio de curvatura;*

Neste método, a sobrelevação só é utilizada depois de se atingir o valor máximo do coeficiente de atrito transversal. Portanto, não é necessária sobrelevação em curvas mais suaves que necessitem de menos do que o valor máximo do coeficiente de atrito transversal para veículos que circulem à velocidade de projecto. Devido ao facto deste método ser completamente dependente do coeficiente de atrito lateral, o seu uso está limitado a estradas e arruamentos de baixa velocidade, onde os condicionalismos frequentemente impedem a realização de sobrelevações.

- 3. A sobrelevação é tal que um veículo viajando à velocidade de projecto tem toda a aceleração lateral suportada pela sobrelevação até um raio de curvatura que requer o valor de sobrelevação máximo. Para curvas mais acentuadas “e” é igual a e_{max} e o atrito lateral é então utilizado para sustentar a aceleração centrífuga até “f” atingir f_{max} . Neste método, primeiro “e” e depois “f” são aumentados na proporção inversa ao raio de curvatura;*

Neste método não é considerado o coeficiente de atrito transversal para curvas com sobrelevação inferior à máxima. A partir do momento em que a sobrelevação máxima é atingida, o coeficiente de atrito transversal aumenta rapidamente. Para veículos que circulam a uma velocidade média inferior à de projecto (Velocidade Média de Circulação), este método origina coeficientes de atrito negativos tanto maiores, quanto maiores são as curvas. À medida que o raio das curvas vai diminuindo, o coeficiente de atrito aumenta rapidamente até atingir o máximo.

4. *Este método é igual ao anterior, excepto no facto de ser baseado na média de velocidades de circulação, em vez de ser baseado na velocidade de projecto;*

O Método 4 foi desenvolvido para colmatar as falhas do Método 3, utilizando valores de sobreelevação adequados a velocidades inferiores às de projecto. Este método considera uma velocidade média de circulação em que toda a aceleração lateral é sustentada pela sobreelevação, até esta atingir um valor máximo. A partir deste valor máximo o coeficiente de atrito aumenta rapidamente. Esta velocidade média de circulação é um valor aproximado que normalmente está compreendido entre 80 a 100% da velocidade de projecto como se pode verificar no Quadro 4.13.

Este método apresenta as mesmas desvantagens do Método 3, ainda que num grau mais pequeno.

Quadro 4.13 - Velocidade Média de Circulação (AASHTO, 2004)

Velocidade de Projecto (km/h)	Média da Velocidade de Circulação (km/h)
20	20
30	30
40	40
50	47
60	55
70	63
80	70
90	77
100	85
110	91
120	98
130	102

5. *A sobreelevação e o coeficiente de atrito transversal estão numa relação curvilínea com o inverso do raio da curva, atingindo valores entre os obtidos no Método 1 e no Método 4.*

O Método 5 origina uma linha curva que se situa entre a triangulação formada pelos Métodos 1 e 4, retendo as vantagens de ambos através de uma distribuição parabólica. Representa uma distribuição prática de sobreelevações e coeficientes de atrito transversais para todos os raios de curvatura.

Apresenta-se seguidamente a Figura 4.3, na qual a numeração apresentada corresponde aos métodos explicados anteriormente.

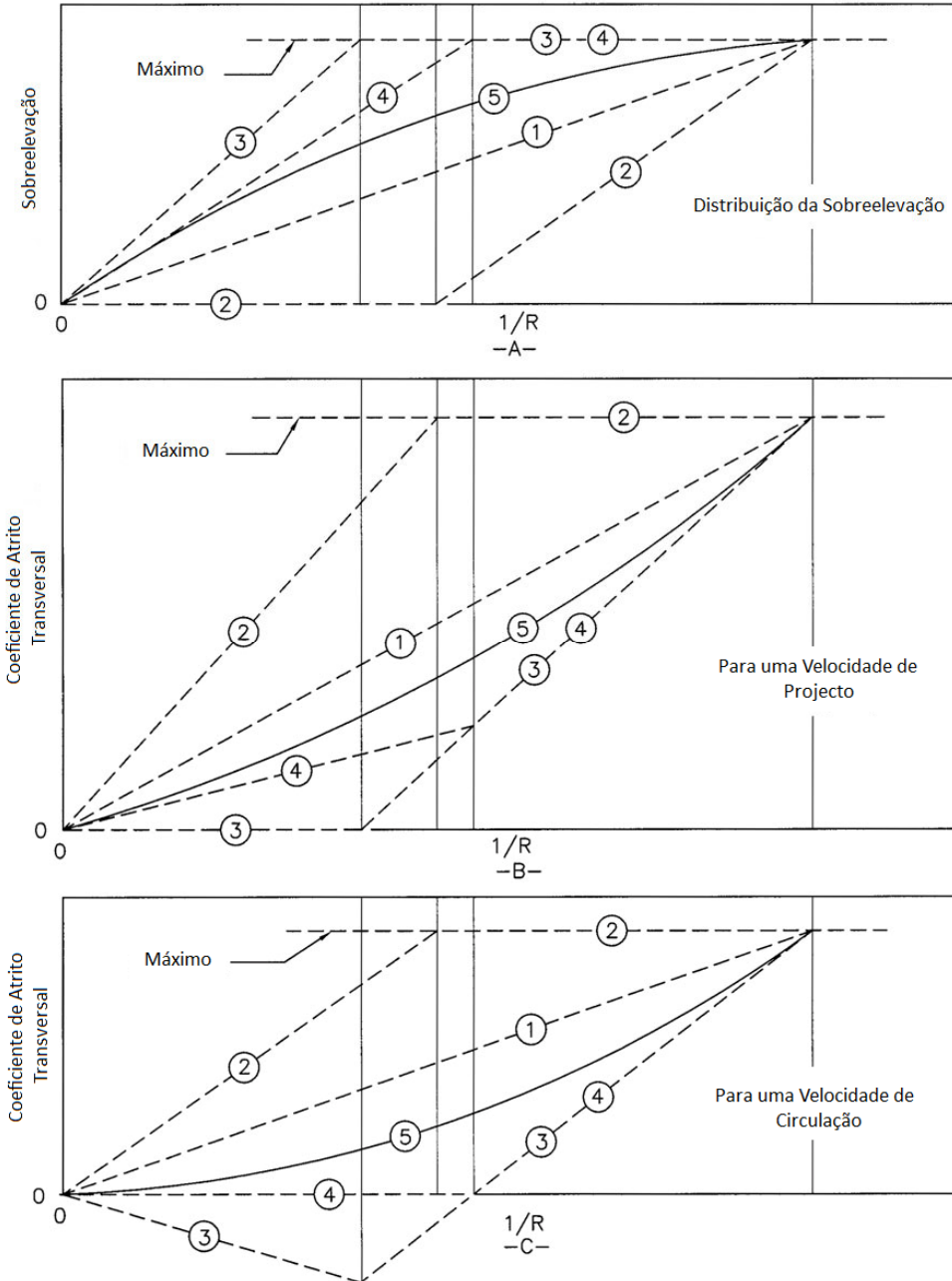


Figura 4.3 - Métodos de Distribuição da Sobrelevação e dos Coeficientes de Atrito Transversal (AASHTO, 2004)

4.3.7. Arruamentos Urbanos de Baixa Velocidade

Em arruamentos urbanos onde a velocidade é relativamente baixa e variável, o uso de sobrelevação em curvas deve ser minimizado. Esta deve ser utilizada apenas quando o valor do coeficiente de atrito não é suficiente para sustentar a aceleração centrífuga.

Embora a sobrelevação seja vantajosa para a circulação de tráfego, o seu uso em arruamentos de baixa velocidade pode ser impraticável devido a vários factores tais como grandes áreas pavimentadas, questões de drenagem, a necessidade de manter pendentes das propriedades adjacentes, etc.

Segundo a AASHTO, quando a sobrelevação é mesmo necessária, deve ser calculada através do Método 2, o que resulta nos valores constantes no Quadro 4.14.

Esta situação de aplicação de sobrelevações em Arruamentos Urbanos de Baixa Velocidade não está contemplada na actual Norma de Traçado portuguesa e sai do âmbito desta dissertação mas é curioso perceber que o Método 2 utilizado pela AASHTO para o cálculo das sobrelevações neste caso particular é, como veremos mais à frente, utilizado para o cálculo de sobrelevações em secção corrente de estrada, num dos países em estudo.

Quadro 4.14 - Raio Mínimo e Sobrelevação para Arruamentos Urbanos de Baixa Velocidade (AASHTO, 2004)

e %	V _D = 20 km/h R (m)	V _D = 30 km/h R (m)	V _D = 40 km/h R (m)	V _D = 50 km/h R (m)	V _D = 60 km/h R (m)	V _D = 70 km/h R (m)
-6,0	11	32	74	151	258	429
-5,0	10	31	70	141	236	386
-4,0	10	30	66	131	218	351
-3,0	10	28	63	123	202	322
-2,8	10	28	62	122	200	316
-2,6	10	28	62	120	197	311
-2,4	10	28	61	119	194	306
-2,2	10	27	61	117	192	301
-2,0	10	27	60	116	189	297
-1,5	9	27	59	112	183	286
0,0	9	25	55	104	167	257
1,5	9	24	51	96	153	234
2,0	9	24	50	94	149	227
2,2	8	23	50	93	148	224
2,4	8	23	50	92	146	222
2,6	8	23	49	91	145	219
2,8	8	23	49	90	143	217
3,0	8	23	48	89	142	214
3,2	8	23	48	89	140	212
3,4	8	23	48	88	139	210
3,6	8	22	47	87	138	207
3,8	8	22	47	86	136	205
4,0	8	22	47	86	135	203
4,2	8	22	46	85	134	201
4,4	8	22	46	84	132	199
4,6	8	22	46	83	131	197
4,8	8	22	45	83	130	195
5,0	8	21	45	82	129	193
5,2	8	21	45	81	128	191
5,4	8	21	44	81	127	189
5,6	8	21	44	80	125	187
5,8	8	21	44	79	124	185
6,0	8	21	43	79	123	184
6,2	8	21	43	78	122	182
6,4	8	21	43	78	121	180
6,6	8	20	43	77	120	179
6,8	8	20	42	76	119	177
7,0	7	20	42	76	118	175
7,2	7	20	42	75	117	174
7,4	7	20	41	75	116	172
7,6	7	20	41	74	115	171
7,8	7	20	41	73	114	169
8,0	7	20	41	73	113	168
8,2	7	20	40	72	112	166
8,4	7	19	40	72	112	165
8,6	7	19	40	71	111	163
8,8	7	19	40	71	110	162
9,0	7	19	39	70	109	161
9,2	7	19	39	70	108	159
9,4	7	19	39	69	107	158
9,6	7	19	39	69	107	157
9,8	7	19	38	68	106	156
10,0	7	19	38	68	105	154
10,2	7	19	38	67	104	153
10,4	7	18	38	67	103	152
10,6	7	18	37	67	103	151
10,8	7	18	37	66	102	150
11,0	7	18	37	66	101	148
11,2	7	18	37	65	101	147
11,4	7	18	37	65	100	146
11,6	7	18	36	64	99	145
11,8	7	18	36	64	98	144
12,0	7	18	36	64	98	143

4.3.8. Estradas Rurais, Auto-estradas, Vias Rápidas Urbanas e Arruamentos Urbanos de Alta Velocidade

Em estradas rurais, auto-estradas, vias rápidas urbanas e arruamentos onde a velocidade é relativamente elevada e uniforme, as curvas são providas de sobrelevação.

Para evitar despistes, que normalmente ocorrem em curvas de raio intermédio a elevado, é desejável que as sobrelevações sejam aproximadas às obtidas através do Método 4, dado que a sobrelevação sustém quase toda a aceleração centrífuga para velocidades médias de circulação e o coeficiente de atrito transversal está disponível para velocidades ligeiramente mais elevadas. Por outro lado, o Método 1, que evita a utilização da sobrelevação máxima para a maior parte das curvas também é desejável.

O Método 5 deve ser utilizado para o cálculo das sobrelevações pois, através de uma distribuição parabólica (Figura 4.4), pretende manter as vantagens do Método 1 e 4.

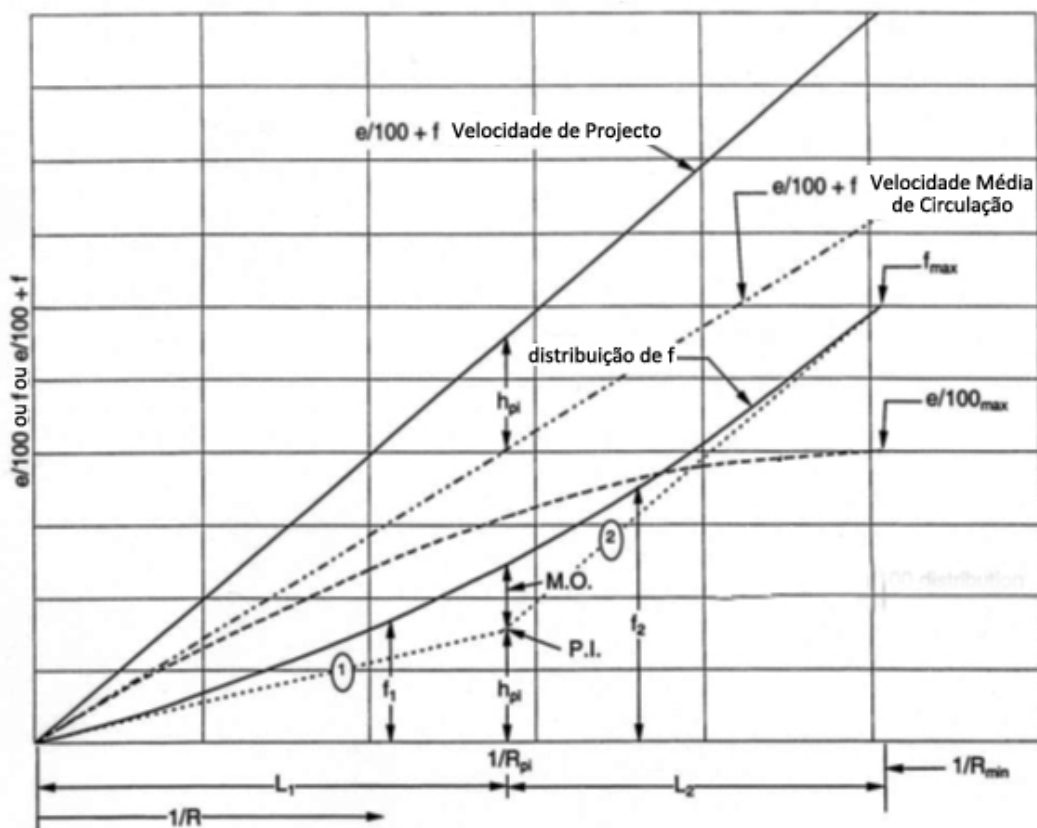


Figura 4.4 - Procedimento do Método 5 para a distribuição da Sobrelevação (AASHTO, 2004)

O procedimento de cálculo do Método 5 tem a seguinte sequência:

$$0.01e + f = \frac{V_D^2}{127R} \quad (4.7)$$

Onde:

$V_D = V$ - velocidade de projecto [km/h];

$e_{\max} = e$ - sobreelevação máxima [%];

$f_{\max} = e$ - coeficiente de atrito transversal máximo admissível;

$R_{\min} = R$ - raio mínimo [m];

$R_{PI} = R$ - raio no Ponto de Intersecção, PI, das rectas (1) e (2) da curva de distribuição parabólica (= R no ponto de intersecção de $0.01e_{\max}$ e $(0.01e+f)_R$);

V_R - velocidade de circulação [km/h]

Temos:

$$R_{\min} = \frac{V_D^2}{127(0.01e_{\max} + f_{\max})} \quad (4.8)$$

E

$$R_{PI} = \frac{V_R^2}{1.27e_{\max}} \quad (4.9)$$

Porque $(0.01 + f)_D - (0.01e + f)_R = h$, no ponto R_{PI} , iguala-se R_{\min} a R_{PI} e a equação reduz-se à seguinte:

$$h_{PI} = \left(\frac{(0.01e_{\max})V_D^2}{V_R^2} \right) - 0.01e_{\max} \quad (4.10)$$

Também,

$$S_1 = h_{PI} \times R_{PI} \quad (4.11)$$

Onde S_1 é o declive da recta (1) e:

$$S_2 = \frac{f_{\max} - h_{PI}}{1/R_{\min} - 1/R_{PI}} \quad (4.12)$$

Onde S_2 é o declive da recta (2).

A bissectriz de uma curva vertical assimétrica é dada pela equação:

$$MO = \frac{L_1 L_2 (S_2 - S_1)}{2(L_1 - L_2)} \quad (4.13)$$

Em que $L_1 = 1/R_{PI}$ e $L_2 = 1/R_{\min} - 1/R_{PI}$

Substituindo, fica:

$$MO = \frac{1}{R_{PI}} \left(\frac{1}{R_{\min}} - \frac{1}{R_{PI}} \right) \left(\frac{S_2 - S_1}{2} \right) R_{\min} \quad (4.14)$$

E,

$$(0.01e + f)_D = \frac{(0.01e_{\max} + f_{\max})R_{\min}}{R} \quad (4.15)$$

Em que R é o raio em qualquer ponto.

Utilizando a equação geral para uma curva vertical:

$$\frac{Y}{MO} = \left(\frac{X}{L} \right)^2 \quad (4.16)$$

Quando $1/R \leq 1/R_{PI}$,

$$f_1 = MO \left(\frac{R_{PI}}{R} \right)^2 + \frac{S_1}{R} \quad (4.17)$$

Onde f_1 = distribuição de f em qualquer ponto $1/R \leq 1/R_{PI}$ e

$$0.01e_1 = (0.01e + f)_D - f_1 \quad (4.18)$$

Onde $0.01e_1$ = distribuição de $0.01e$ em qualquer ponto $1/R \leq 1/R_{PI}$.

Quando $1/R > 1/R_{PI}$,

$$f_2 = MO \left(\frac{1/R_{\min} - 1/R}{1/R_{\min} - 1/R_{PI}} \right)^2 + h_{PI} + S_2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{PI}} \right) \quad (4.19)$$

Onde f_2 = distribuição de f em qualquer ponto $1/R > 1/R_{PI}$ e

$$0.01e_2 = (0.01e + f)_D - f_2 \quad (4.20)$$

Onde $0.01e_2$ = distribuição de $0.01e$ em qualquer ponto $1/R > 1/R_{PI}$.

Os resultados deste procedimento de cálculo, para cada um dos cinco valores máximos de sobrelevação, são apresentados de seguida nos Quadros 4.15 a 4.19. Estes quadros indicam os raios para várias combinações de sobrelevação e velocidades de projecto. Para valores de raios intermédios aos apresentados nas tabelas, não é necessária a interpolação de valores, basta escolher o valor do raio imediatamente abaixo e usar a sobrelevação correspondente.

Quadro 4.15 - Raio mínimo para um valor de sobrelevação máximo de 4% (AASHTO, 2004)

e	V _D = 20 km/h	V _D = 30 km/h	V _D = 40 km/h	V _D = 50 km/h	V _D = 60 km/h	V _D = 70 km/h	V _D = 80 km/h	V _D = 90 km/h	V _D = 100 km/h
%	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)
1,5	163	371	679	951	1310	1740	2170	2640	3250
2,0	102	237	441	632	877	1180	1490	1830	2260
2,2	75	187	363	534	749	1020	1290	1590	1980
2,4	51	132	273	435	626	865	1110	1390	1730
2,6	38	99	209	345	508	720	944	1200	1510
2,8	30	79	167	283	422	605	802	1030	1320
3,0	24	64	137	236	356	516	690	893	1150
3,2	20	54	114	199	303	443	597	779	1010
3,4	17	45	96	170	260	382	518	680	879
3,6	14	38	81	144	222	329	448	591	767
3,8	12	31	67	121	187	278	381	505	658
4,0	8	22	47	86	135	203	280	375	492

Quadro 4.16 - Raio mínimo para um valor de sobrelevação máximo de 6% (AASHTO, 2004)

e %	V _D =20 km/h R (m)	V _D =30 km/h R (m)	V _D =40 km/h R (m)	V _D =50 km/h R (m)	V _D =60 km/h R (m)	V _D =70 km/h R (m)	V _D =80 km/h R (m)	V _D =90 km/h R (m)	V _D =100 km/h R (m)	V _D =110 km/h R (m)	V _D =120 km/h R (m)	V _D =130 km/h R (m)
1,5	194	421	738	1050	1440	1910	2360	2880	3510	4060	4770	5240
2,0	138	299	525	750	1030	1380	1710	2090	2560	2970	3510	3880
2,2	122	265	465	668	919	1230	1530	1880	2300	2670	3160	3500
2,4	109	236	415	599	825	1110	1380	1700	2080	2420	2870	3190
2,6	97	212	372	540	746	1000	1260	1540	1890	2210	2630	2930
2,8	87	190	334	488	676	910	1150	1410	1730	2020	2420	2700
3,0	78	170	300	443	615	831	1050	1290	1590	1870	2240	2510
3,2	70	152	269	402	561	761	959	1190	1470	1730	2080	2330
3,4	61	133	239	364	511	697	882	1100	1360	1600	1940	2180
3,6	51	113	206	329	465	640	813	1020	1260	1490	1810	2050
3,8	42	96	177	294	422	586	749	939	1170	1390	1700	1930
4,0	36	82	155	261	380	535	690	870	1090	1300	1590	1820
4,2	31	72	136	234	343	488	635	806	1010	1220	1500	1720
4,4	27	63	121	210	311	446	584	746	938	1140	1410	1630
4,6	24	56	108	190	283	408	538	692	873	1070	1330	1540
4,8	21	50	97	172	258	374	496	641	812	997	1260	1470
5,0	19	45	88	156	235	343	457	594	755	933	1190	1400
5,2	17	40	79	142	214	315	421	549	701	871	1120	1330
5,4	15	36	71	128	195	287	386	506	648	810	1060	1260
5,6	13	32	63	115	176	260	351	463	594	747	980	1190
5,8	11	28	56	102	156	232	315	416	537	679	900	1110
6,0	8	21	43	79	123	184	252	336	437	560	756	951

Quadro 4.17 - Raio mínimo para um valor de sobrelevação máximo de 8% (AASHTO, 2004)

e %	V _D =20 km/h R (m)	V _D =30 km/h R (m)	V _D =40 km/h R (m)	V _D =50 km/h R (m)	V _D =60 km/h R (m)	V _D =70 km/h R (m)	V _D =80 km/h R (m)	V _D =90 km/h R (m)	V _D =100 km/h R (m)	V _D =110 km/h R (m)	V _D =120 km/h R (m)	V _D =130 km/h R (m)
1,5	184	443	784	1090	1490	1970	2440	2970	3630	4180	4900	5360
2,0	133	322	571	791	1090	1450	1790	2190	2680	3090	3640	4000
2,2	119	288	512	711	976	1300	1620	1980	2420	2790	3290	3620
2,4	107	261	463	644	885	1190	1470	1800	2200	2550	3010	3310
2,6	97	237	421	587	808	1080	1350	1650	2020	2340	2760	3050
2,8	88	216	385	539	742	992	1240	1520	1860	2160	2550	2830
3,0	81	199	354	496	684	916	1150	1410	1730	2000	2370	2630
3,2	74	183	326	458	633	849	1060	1310	1610	1870	2220	2460
3,4	68	169	302	425	588	790	988	1220	1500	1740	2080	2310
3,6	62	156	279	395	548	738	924	1140	1410	1640	1950	2180
3,8	57	144	259	368	512	690	866	1070	1320	1540	1840	2060
4,0	52	134	241	344	479	648	813	1010	1240	1450	1740	1950
4,2	48	124	224	321	449	608	766	948	1180	1380	1650	1850
4,4	43	115	208	301	421	573	722	895	1110	1300	1570	1760
4,6	38	106	192	281	395	540	682	847	1050	1240	1490	1680
4,8	33	96	178	263	371	509	645	803	996	1180	1420	1610
5,0	30	87	163	246	349	480	611	762	947	1120	1360	1540
5,2	27	78	148	229	328	454	579	724	901	1070	1300	1480
5,4	24	71	136	213	307	429	549	689	859	1020	1250	1420
5,6	22	65	125	198	288	405	521	656	819	975	1200	1360
5,8	20	59	115	185	270	382	494	625	781	933	1150	1310
6,0	19	55	106	172	253	360	469	595	746	894	1100	1260
6,2	17	50	98	161	238	340	445	567	713	857	1060	1220
6,4	16	46	91	151	224	322	422	540	681	823	1020	1180
6,6	15	43	85	141	210	304	400	514	651	789	982	1140
6,8	14	40	79	132	198	287	379	489	620	757	948	1100
7,0	13	37	73	123	185	270	358	464	591	724	914	1070
7,2	12	34	68	115	174	254	338	440	561	691	879	1040
7,4	11	31	62	107	162	237	318	415	531	657	842	998
7,6	10	29	57	99	150	221	296	389	499	621	803	962
7,8	9	26	52	90	137	202	273	359	462	579	757	919
8,0	7	20	41	73	113	168	229	304	394	501	667	832

Quadro 4.18 - Raio mínimo para um valor de sobreelevação máximo de 10% (AASHTO, 2004)

e	V _D =20 km/h	V _D =30 km/h	V _D =40 km/h	V _D =50 km/h	V _D =60 km/h	V _D =70 km/h	V _D =80 km/h	V _D =90 km/h	V _D =100 km/h	V _D =110 km/h	V _D =120 km/h	V _D =130 km/h
%	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)	R (m)
1,5	197	454	790	1110	1520	2000	2480	3010	3690	4250	4960	5410
2,0	145	333	580	815	1120	1480	1840	2230	2740	3160	3700	4050
2,2	130	300	522	735	1020	1340	1660	2020	2480	2860	3360	3680
2,4	118	272	474	669	920	1220	1520	1840	2260	2620	3070	3370
2,6	108	249	434	612	844	1120	1390	1700	2080	2410	2830	3110
2,8	99	229	399	564	778	1030	1290	1570	1920	2230	2620	2880
3,0	91	211	368	522	720	952	1190	1460	1790	2070	2440	2690
3,2	85	196	342	485	670	887	1110	1360	1670	1940	2280	2520
3,4	79	182	318	453	626	829	1040	1270	1560	1820	2140	2370
3,6	73	170	297	424	586	777	974	1200	1470	1710	2020	2230
3,8	68	159	278	398	551	731	917	1130	1390	1610	1910	2120
4,0	64	149	261	374	519	690	866	1060	1310	1530	1810	2010
4,2	60	140	245	353	490	652	820	1010	1240	1450	1720	1910
4,4	56	132	231	333	464	617	777	953	1180	1380	1640	1820
4,6	53	124	218	315	439	586	738	907	1120	1310	1560	1740
4,8	50	117	206	299	417	557	703	864	1070	1250	1490	1670
5,0	47	111	194	283	396	530	670	824	1020	1200	1430	1600
5,2	44	104	184	269	377	505	640	788	975	1150	1370	1540
5,4	41	98	174	256	359	482	611	754	934	1100	1320	1480
5,6	39	93	164	243	343	461	585	723	896	1060	1270	1420
5,8	36	88	155	232	327	441	561	693	860	1020	1220	1370
6,0	33	82	146	221	312	422	538	666	827	976	1180	1330
6,2	31	77	138	210	298	404	516	640	795	941	1140	1280
6,4	28	72	130	200	285	367	496	616	766	907	1100	1240
6,6	26	67	121	191	273	372	476	593	738	876	1060	1200
6,8	24	62	114	181	261	357	458	571	712	846	1030	1170
7,0	22	58	107	172	249	342	441	551	688	819	993	1130
7,2	21	55	101	164	238	329	425	532	664	792	963	1100
7,4	20	51	95	156	228	315	409	513	642	767	934	1070
7,6	18	48	90	148	218	303	394	496	621	743	907	1040
7,8	17	45	85	141	208	291	380	479	601	721	882	1010
8,0	16	43	80	135	199	279	366	463	582	699	857	981
8,2	15	40	76	128	190	268	353	448	564	679	834	956
8,4	14	38	72	122	182	257	339	432	546	660	812	932
8,6	14	36	68	116	174	246	326	417	528	641	790	910
8,8	13	34	64	110	166	236	313	402	509	621	770	888
9,0	12	32	61	105	158	225	300	386	491	602	751	867
9,2	11	30	57	99	150	215	287	371	472	582	731	847
9,4	11	28	54	94	142	204	274	354	453	560	709	828
9,6	10	26	50	88	133	192	259	337	432	537	685	809
9,8	9	24	46	81	124	179	242	316	407	509	656	786
10,0	7	19	38	68	105	154	210	277	358	454	597	739

Quadro 4.19 - Raio mínimo para um valor de sobrelevação máximo de 12% (AASHTO, 2004)

e %	V _D =20 km/h R (m)	V _D =30 km/h R (m)	V _D =40 km/h R (m)	V _D =50 km/h R (m)	V _D =60 km/h R (m)	V _D =70 km/h R (m)	V _D =80 km/h R (m)	V _D =90 km/h R (m)	V _D =100 km/h R (m)	V _D =110 km/h R (m)	V _D =120 km/h R (m)	V _D =130 km/h R (m)
1,5	210	459	804	1130	1540	2030	2510	3040	3720	4280	4990	5440
2,0	155	338	594	835	1150	1510	1870	2270	2770	3190	3740	4080
2,2	139	306	536	755	1040	1360	1690	2050	2510	2900	3390	3710
2,4	127	278	488	688	942	1250	1550	1880	2300	2650	3110	3400
2,6	116	255	448	631	865	1140	1420	1730	2110	2440	2860	3140
2,8	107	235	413	583	799	1060	1320	1600	1960	2260	2660	2910
3,0	99	218	382	541	742	980	1220	1490	1820	2110	2480	2720
3,2	92	202	356	504	692	914	1140	1390	1700	1970	2320	2550
3,4	86	189	332	472	648	856	1070	1300	1600	1850	2180	2400
3,6	81	177	312	443	609	805	1010	1230	1510	1750	2060	2270
3,8	76	166	293	417	573	759	947	1160	1420	1650	1950	2150
4,0	71	157	276	393	542	718	896	1100	1350	1560	1850	2040
4,2	67	148	261	372	513	680	850	1040	1280	1490	1760	1940
4,4	64	140	247	353	487	646	808	988	1220	1420	1680	1850
4,6	60	132	234	335	463	615	770	941	1160	1350	1600	1770
4,8	57	126	222	319	441	586	734	899	1110	1290	1530	1700
5,0	54	119	211	304	421	560	702	860	1060	1240	1470	1630
5,2	52	114	201	290	402	535	672	824	1020	1190	1410	1570
5,4	49	108	192	277	384	513	644	790	973	1140	1360	1510
5,6	47	103	183	265	368	492	618	759	936	1100	1310	1460
5,8	45	98	175	254	353	472	594	730	900	1060	1260	1410
6,0	43	94	167	244	339	454	572	703	867	1020	1220	1360
6,2	41	90	159	234	326	436	551	678	837	981	1180	1310
6,4	39	86	153	225	313	420	531	654	808	948	1140	1270
6,6	37	82	146	216	302	405	512	632	781	917	1100	1230
6,8	35	78	140	208	290	391	494	611	755	888	1070	1200
7,0	34	75	134	200	280	377	478	591	731	860	1040	1160
7,2	32	71	128	192	270	364	462	572	708	834	1010	1130
7,4	30	68	122	185	260	352	447	554	686	810	974	1100
7,6	29	65	117	178	251	340	433	537	666	786	947	1070
7,8	27	61	112	172	243	329	420	521	646	764	921	1040
8,0	26	58	107	165	235	319	407	506	628	743	897	1020
8,2	24	55	102	159	227	309	395	491	610	723	874	989
8,4	23	52	97	154	219	299	383	477	593	704	852	965
8,6	22	50	93	148	212	290	372	464	577	686	831	942
8,8	20	47	88	142	205	281	361	451	562	668	811	921
9,0	19	45	85	137	198	273	351	439	547	652	792	900
9,2	18	43	81	132	191	264	341	428	533	636	774	880
9,4	18	41	77	127	185	256	332	416	520	621	756	861
9,6	17	39	74	123	179	249	323	406	507	606	739	843
9,8	16	37	71	118	173	241	314	395	494	592	723	826
10,0	15	36	68	114	167	234	305	385	482	579	708	809
10,2	14	34	65	110	161	226	296	375	471	566	693	793
10,4	14	33	62	105	155	219	288	365	459	553	679	778
10,6	13	31	59	101	150	212	279	355	448	541	665	763
10,8	12	30	57	97	144	204	270	345	436	529	652	749
11,0	12	28	54	93	139	197	261	335	423	516	639	735
11,2	11	27	51	89	133	189	252	324	411	503	626	722
11,4	11	25	49	85	127	182	242	312	397	488	613	709
11,6	10	24	46	80	120	173	232	300	382	472	598	697
11,8	9	22	43	75	113	163	219	285	364	453	579	685
12,0	7	18	36	64	98	143	194	255	328	414	540	665

5. ANÁLISE COMPARATIVA

5.1. Análise Comparativa dos Parâmetros em Estudo

Após análise das normas em vigor e dos critérios de aplicação da sobrelevação em Portugal, Espanha, França e Estados Unidos da América, o Quadro 5.1 pretende resumir os parâmetros em estudo, entre eles, coeficientes de atrito transversal, sobrelevações máximas admitidas e raios mínimos decorrentes para as diferentes velocidades de referência.

No caso das normas portuguesa e americana a velocidade de referência corresponde à velocidade base, denominada velocidade de projecto no caso da AASHTO enquanto que na norma francesa equivale à velocidade regulamentar e no caso espanhol corresponde à velocidade específica.

Quadro 5.1 - Quadro Comparativo dos Parâmetros em Estudo

V _{referência} (km/h)	JAE, 1994 ⁽¹⁾			N3C- IC Trazado, 2000			SETRA, 2000 ⁽⁴⁾			AASHTO, 2004		
	f _t	Se	R (m)	f _t	Se	R (m)	f _t	Se	R (m)	f _t	Se	R (m)
40	0,159	0,07	55	0,180	0,07 ⁽²⁾	50	--	--	--	0,23	0,06	43
50	0,162	0,07	85	0,166	0,07 ⁽²⁾	85	0,200	0,07	73	0,19	0,06	79
60	0,148	0,07	130	0,155	0,07 ⁽²⁾	130	--	--	--	0,17	0,06	123
70	0,144	0,07	180	0,137	0,07 ⁽²⁾	190	0,160	0,07	168	0,15	0,06	184
80	0,140	0,07	240	0,122	0,08 ⁽³⁾	250	--	--	--	0,14	0,06	252
90	0,129	0,07	320	0,113	0,08 ⁽³⁾	350	0,135	0,07	311	0,13	0,06	336
100	0,117	0,07	420	0,104	0,08 ⁽³⁾	450	--	--	--	0,12	0,06	437
110	0,100	0,07	560	0,096	0,08 ⁽³⁾	550	0,118	0,07	507	0,11	0,06	560
120	0,092	0,07	700	0,087	0,08 ⁽³⁾	700	--	--	--	0,09	0,06	756
130	0,078	0,07	900	0,078	0,07 ⁽³⁾	900	0,105	0,07	760	0,08	0,06	951

⁽¹⁾ Raio mínimo absoluto

⁽²⁾ Estradas

⁽³⁾ Auto-estradas e vias rápidas

⁽⁴⁾ Raio mínimo normal (*seuil du confort*)

Analisando o Quadro 5.1, verificam-se diferenças a vários níveis.

Relativamente ao coeficiente de atrito, verifica-se que os valores diferem em todos os países, sendo a França a que apresenta valores mais elevados para cada uma das velocidades de

referência. Estes valores resultam em raios mínimos inferiores quando comparados com os restantes, e portanto menos conservativos.

É também de notar que apenas as normas francesas e portuguesas se referem a raios mínimos normais (*seuil du confort*) e raios mínimos absolutos (*seuil de sécurité*), muito embora os raios mínimos normais franceses sejam inferiores aos raios mínimos absolutos portugueses.

Em Espanha, a sobrelevação máxima difere consoante se trate de auto-estradas e vias rápidas (Grupo I) ou outras estradas (Grupo II). O primeiro grupo, tal como as normas portuguesas, admite uma sobrelevação máxima de 7%, que resulta em raios muito semelhantes as portuguesas. O segundo grupo admite uma sobrelevação máxima de 8%, excepto na velocidade 130 km/h, em que a sobrelevação de 7% se mantém. Contudo, os valores dos raios mínimos correspondentes continuam a não diferir muito dos portugueses, pois os coeficientes de atrito considerados são ligeiramente inferiores aos portugueses, compensando de certa forma a diferença da sobrelevação. As principais diferenças acontecem para as velocidades de 90 km/h e 100 km/h, em que os raios são ligeiramente superiores.

Para se poder efectuar esta análise comparativa, apresenta-se, para a AASHTO, o caso em que a sobrelevação máxima admissível é de 6%. No entanto, conforme referido anteriormente, segundo a AASHTO, nenhum valor de sobrelevação máximo é universalmente aplicável e, dependendo de vários factores, podem ser consideradas várias taxas de sobrelevação máxima.

A principal alteração da versão de 2001 das normas da AASHTO para a versão agora em vigor (2004) foi a revisão das sobrelevações e dos coeficientes de atrito, principalmente para velocidades baixas. Verifica-se, observando o Quadro 5.1, que, para velocidades entre 40 km/h e 60 km/h, os coeficientes de atrito considerados pelas normas americanas são consideravelmente superiores, e mesmo para uma sobrelevação de 6%, resultam em raios mínimos inferiores quando comparados com os portugueses e espanhóis. Para velocidades entre 70 km/h e 130 km/h, os raios da norma americana são ligeiramente superiores devido à diferença de sobrelevação considerada.

O Quadro 5.2 faz a comparação entre as sobrelevações a considerar para os vários valores de raios em planta possíveis:

Quadro 5.2 - Quadro Comparativo das Sobrelevações

R (m)	JAE, 1994		N3C- IC Trazado, 2000		SETRA, 2000					AASHTO, 2004 ⁽⁵⁾				
	Estrada com 2 vias	Estrada com 2 x 2 vias	C-40, C-60, C-80	AP, AV, C-100	R60	R80, T80	T100	L2	L1	V _D =40 km/h	V _D =60 km/h	V _D =80 km/h	V _D =100 km/h	V _D =120 km/h
100	7,0	7,0	7,0	--	--	--	--	--	--	4,8	--	--	--	--
200	7,0	7,0	7,0	--	4,5	--	--	--	--	3,8	5,4	--	--	--
300	7,0	7,0	7,0	8,0	3,3	5,6	--	--	--	3,0	4,6	6,0	--	--
400	7,0	7,0	6,59	8,0	2,7	4,2	--	7,0	--	2,6	4,0	5,4	--	--
500	7,0	7,0	5,73	8,0	2,5	3,3	5,7	2,5	--	2,2	3,6	4,8	6,0	--
600	6,0	7,0	5,05	8,0	^	2,7	4,5	2,5	7,0	2,0	3,2	4,4	5,6	--
700	5,5	7,0	4,53	8,0	^	2,5	3,6	^	3,8	2,0	2,8	4,0	5,4	--
800	5,5	7,0	4,12	7,51	^	2,5	3,0	^	2,5	^	2,6	3,8	5,0	6,0
900	5,0	7,0	3,79	6,97	^	^	2,5	^	2,5	^	2,4	3,4	4,6	5,8
1000	4,5	7,0	3,53	6,47	^	^	2,5	^	^	^	2,2	3,2	4,4	5,6
1500	3,5	5,5	2,70	4,78	^	^	^	^	^	^	^	2,4	3,2	4,2
2000	2,5	4,5	2,27	3,83	^	^	^	^	^	^	^	2,0	2,6	3,4
2500	^	4,0	2,0	3,24	^	^	^	^	^	^	^	^	2,2	2,8
3000	^	3,0	2,0	2,83	^	^	^	^	^	^	^	^	2,0	2,4
3500	^	2,5	^	2,54	^	^	^	^	^	^	^	^	1,5	2,2
4000	^	2,5	^	2,32	^	^	^	^	^	^	^	^	^	2,0
5000	^	^	^	2,0	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^
7500	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^

⁽⁵⁾ Os valores apresentados correspondem à taxa de sobrelevação máxima de 6%

^ Perfil transversal a duas águas ($\pm 2,5$ %)

Observando os valores constantes do Quadro 5.2, mais uma vez é visível a diferença de critérios utilizada em cada país.

A actual norma de traçado apresenta o quadro de sobrelevações em curva para duas situações específicas, “Estradas com 2 Vias” e “Estradas com 2 x 2 Vias”. As normas espanholas bem como as francesas fazem a distinção de sobrelevações consoante a classificação das estradas existentes no país. As normas americanas apresentam a sobrelevação para cada um dos raios em função da velocidade de projecto segundo a qual a estrada é projectada.

Da análise dos valores de sobrelevação constantes no quadro é possível concluir que são as normas portuguesas as mais conservativas, ou seja, as que apresentam valores mais elevados de sobrelevação para um mesmo raio. Por outro lado, são as francesas que apresentam valores mais baixos de sobrelevação e consequentemente, as que indicam valores de raio mais baixos para os quais se pode aplicar a inclinação transversal da estrada para efeitos de drenagem (perfil transversal a duas águas a 2,5%).

Relativamente a Espanha e Estados Unidos da América, apresentam valores intermédios, sendo que de ambos, os americanos são os que apresentam valores ligeiramente mais baixos para a sobrelevação.

Esta diferença nos valores de sobrelevação a aplicar para o mesmo raio apenas se justifica devido à utilização de métodos de determinação de sobrelevações que têm por base critérios distintos.

No caso de França, o Método 2, descrito no ponto 4.3.6, corresponde à política de sobrelevações adoptada pela SETRA. Com base neste método, o coeficiente de atrito transversal mobilizado mantém-se constante para cada uma das velocidades de referência, independentemente dos raios das curvas e a sobrelevação varia linearmente em função de $1/R$ entre 2,5 % para o Raio mínimo não sobrelevado (R_{nd}) e 7% para o Raio mínimo (R_m) de acordo com o representado na Figura 5.1.

A zona assinalada a azul em traço descontinuo, na Figura 5.1, representa os raios de curvatura aos quais corresponde uma sobrelevação igual ou inferior a 2,5%.

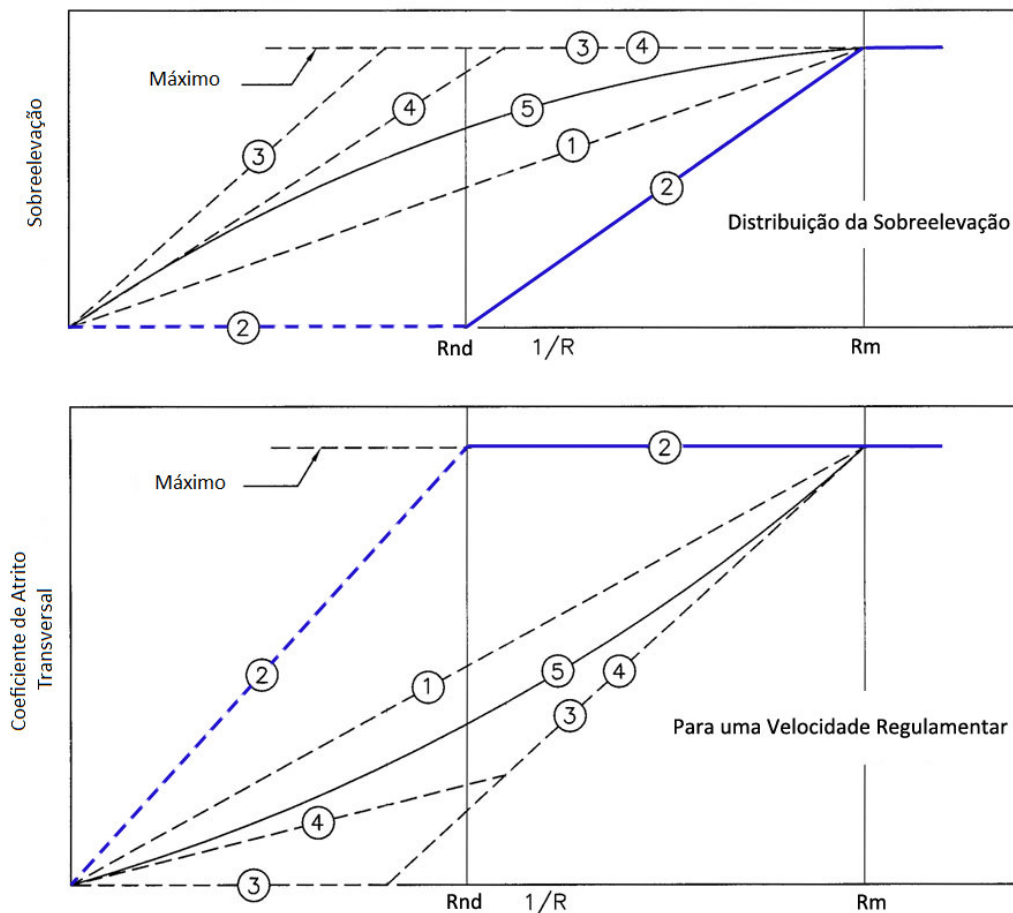


Figura 5.1 - Distribuição da Sobrelevação e dos Coeficientes de Atrito Transversal no caso da SETRA

No caso de Portugal, o Método 4, anteriormente descrito em 4.3.6, está subjacente aos valores de sobrelevação apresentados pela Norma P3/94. Com base neste método, a sobrelevação mantém o valor máximo de 7% entre o Raio Mínimo Absoluto (RA) e o Raio Mínimo Normal (RN), diminuindo a partir deste, conforme o representado na Figura 5.2.

A zona assinalada a vermelho em traço descontínuo, na Figura 5.2, representa os raios de curvatura aos quais corresponde uma sobrelevação igual ou inferior a 7%.

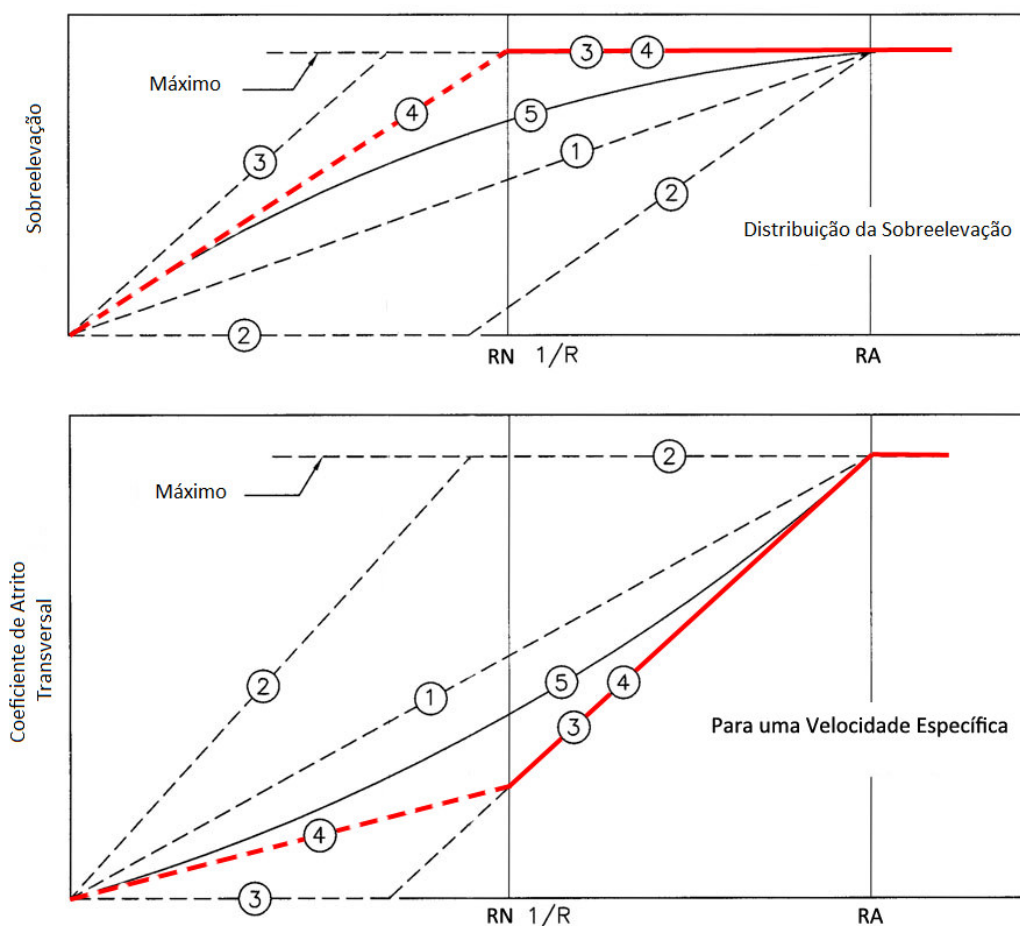


Figura 5.2 - Distribuição da Sobrelevação e dos Coeficientes de Atrito Transversal no caso da JAE

5.2. Sinistralidade nos Países em Estudo

Perante a diversidade de critérios utilizados em cada país poderá questionar-se o nível de segurança rodoviária para o utilizador da via, sobretudo quando um dos factores que potenciam a ocorrência de sinistros rodoviários é a incapacidade dos condutores para controlar o veículo em situações críticas, inclusive ao percorrer uma curva.

Analisando o documento publicado pela UNECE, relativo às “Estatísticas dos Acidentes Rodoviários na Europa e na América do Norte”, podemos verificar que no ano 2004, a França, que segundo se conclui apresenta regras menos conservativas relativamente aos restantes países estudados, é o país que apresenta menos acidentes bem como menos vítimas mortais, por milhão de habitantes, resultantes de acidentes rodoviários (Ver Figuras 5.3 e 5.4).

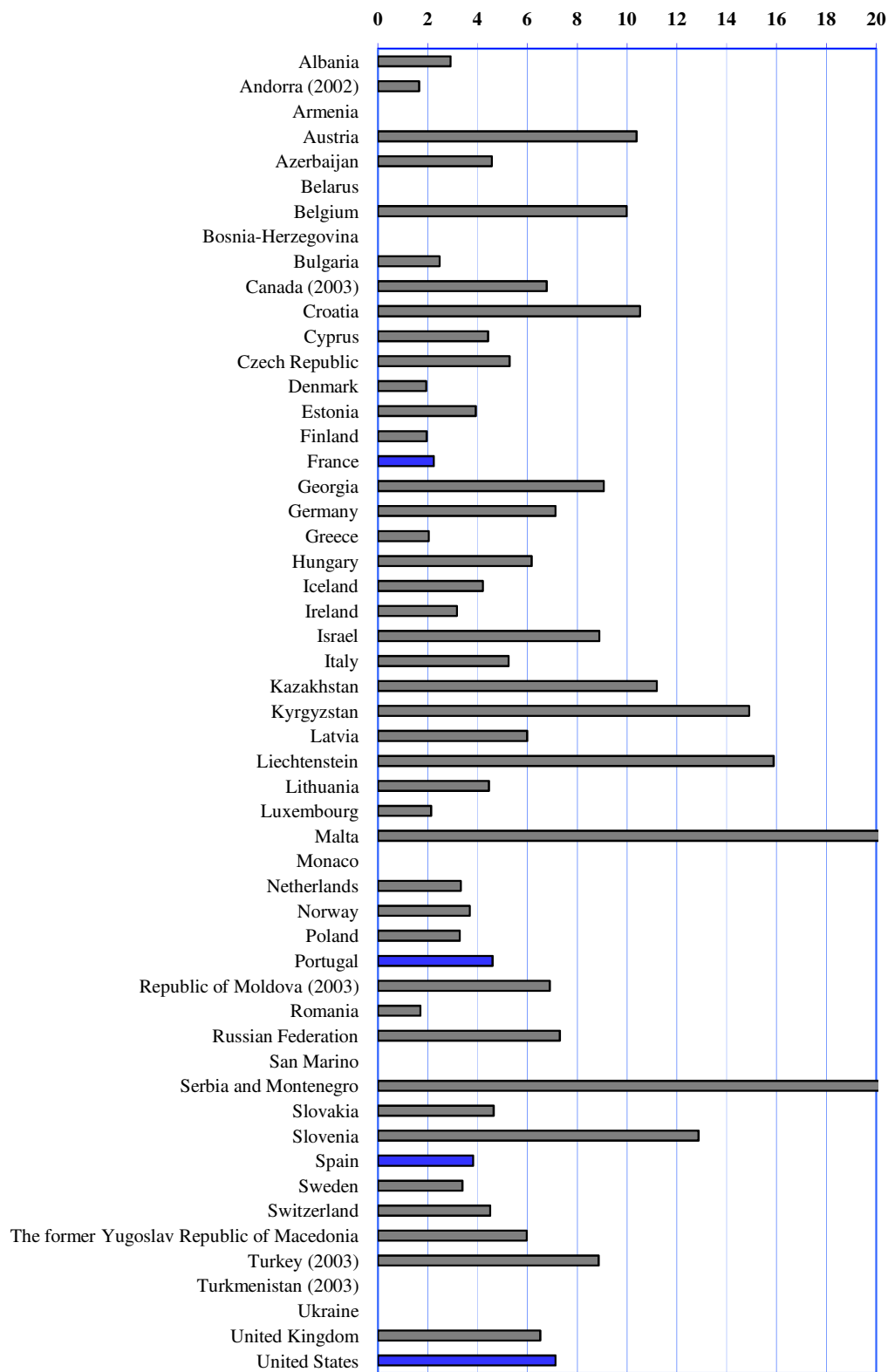


Figura 5.3- Número de acidentes rodoviários por milhar de veículos motorizados, 2004 (ENECE)

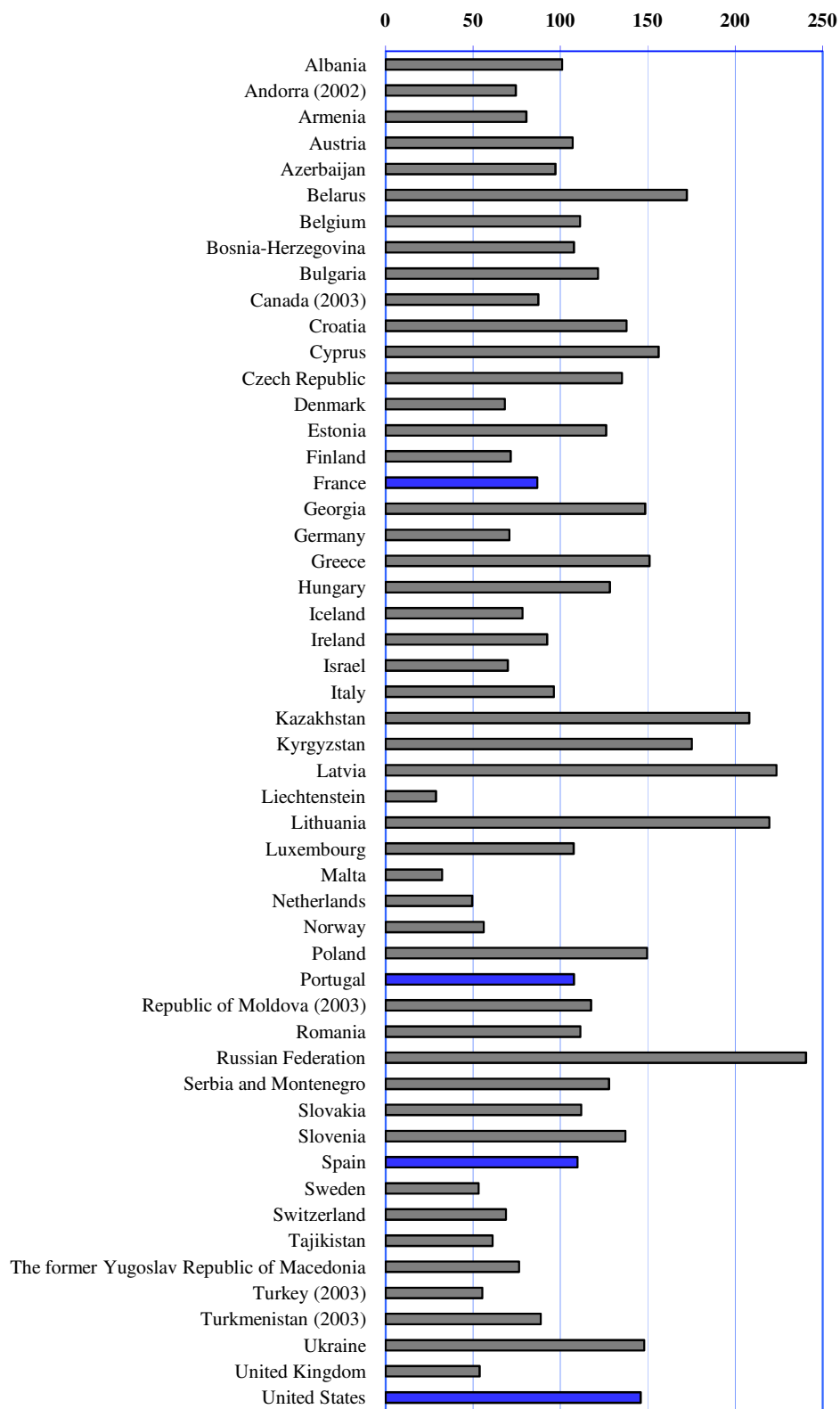


Figura 5.4 - Número de vítimas mortais em acidentes rodoviários por milhão de habitantes, 2004 (ENECE)

Os valores de sinistralidade verificados em Portugal aproximam-se muito dos verificados em Espanha e o país que apresenta mais acidentes rodoviários e mais vítimas mortais é os Estados Unidos da América.

São quatro os supra-factores que estão na base dos sinistros rodoviários, designadamente, humano, veículo, via e ambiente. Estes contêm factores e sub-factores que conjuntamente potenciam a ocorrência de acidentes, nomeadamente, a distração na prática de condução, o desrespeito pelo Código da Estrada, o factor cultural, o estado de conservação e/ou manutenção dos veículos e das vias em si, etc.

Os valores apresentados nas figuras 5.3 e 5.4 são genéricos, e referem-se a acidentes ocorridos nas mais variadas circunstâncias, o que não nos permite tirar conclusões específicas relativamente à utilização dos vários critérios na definição das sobrelevações, mas em termos gerais, os valores de sinistralidade apresentados para os vários países permitem-nos concluir que uma diminuição de sobrelevação não significa necessariamente uma diminuição da segurança nas vias rodoviárias, como se pode verificar ao analisar a baixa sinistralidade existente na França.

Por outro lado, países onde se utilizam maiores valores de sobrelevação, como é o caso de Portugal, potenciam velocidades mais elevadas o que poderá resultar em mais sinistros ou sinistros com consequências mais graves.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na definição dos raios em planta e respectivas sobrelevações, duas grandes questões são alvo de discussão e de opiniões por vezes divergentes. São elas, a fixação dos valores do coeficiente de atrito transversal mobilizado máximo para cada uma das velocidades de referência e a escolha da sobrelevação máxima a utilizar.

Relativamente ao coeficiente de atrito mobilizado parece apropriada a utilização dos valores apresentados na norma da AASHTO (2004). Estes valores, embora não difiram muito dos considerados pela norma portuguesa (JAE, 1994), foram testados recentemente e para velocidades mais baixas foram ligeiramente incrementados.

O coeficiente de atrito depende do tipo de pavimento utilizado bem como das características dos pneus e até das condições climáticas. É certo que os pavimentos mais utilizados nos Estados Unidos (pavimentos rígidos) não são os mais utilizados em Portugal (pavimentos flexíveis) e que as condições climáticas diferem de ponto para ponto e ainda que as características dos pneus dependem da escolha de cada indivíduo. Pode afirmar-se que a conjugação destes factores abrangem uma gama muito vasta de opções, mas, conforme descrito na norma da AASHTO, os valores apresentados para o coeficiente de atrito transversal mobilizado estão dotados de uma margem de segurança que pretende superar esta diversidade.

No que se refere à sobrelevação máxima a considerar, tal como nas normas da AASHTO, parece pertinente adoptar valores distintos em função das características da estrada, directamente relacionadas com a velocidade base. A sobrelevação não é um parâmetro de conforto, antes uma necessidade para compensar o desconforto provocado pela aceleração centrífuga ao circular em curva e os níveis de conforto proporcionados por velocidades base elevadas podem ser superiores aos correspondentes a velocidades baixas.

Admitindo uma sobrelevação máxima de 8% para $40 \text{ km/h} \leq V_B \leq 70 \text{ km/h}$, resultará na possibilidade de utilização de raios inferiores em estradas nacionais, que por vezes são de difícil concepção, com boa parte da aceleração centrífuga compensada e garantindo sempre a segurança. Uma sobrelevação máxima de 6% para $V_B \geq 130 \text{ km/h}$ conduzirá à adopção de raios superiores aos apresentados na actual norma, aumentando a qualidade das estradas projectadas para esta velocidade, a homogeneidade e consequentemente, o conforto na condução. Para $80 \text{ km/h} \leq V_B \leq 110 \text{ km/h}$, a sobrelevação de 7%, considerada já na actual

norma parece apropriada, fazendo bem a transição entre as velocidades base baixas e elevadas.

Tal como nas normas francesas, em que são admitidos dois tipos de raios mínimos, “*seuil de sécutité*” e “*seuil de confort*”, as normas da JAE, apresentam os conceitos de “raio mínimo absoluto” e “raio mínimo normal”. Pensa-se que estes conceitos devem ser eliminados e que o raio mínimo a adoptar deva corresponder a uma sobrelevação e à mobilização de um coeficiente de atrito transversal máximos para cada uma das velocidades de referência.

Face a estas considerações, propõe-se os valores máximos para as sobrelevações e para os coeficientes de atrito mobilizados e os correspondentes valores mínimos para os raios das curvas circulares, de cálculo e arredondados, constantes no Quadro 6.1.

Quadro 6.1- Valores Propostos

V (km/h)	Valores Propostos			
	f_t	Se	$R_{cál.c.} (m)$	$R_{arred.} (m)$
40	0,21	0,08	43	45
50	0,19	0,08	73	75
60	0,17	0,08	113	115
70	0,15	0,08	168	170
80	0,14	0,07	240	240
90	0,13	0,07	319	320
100	0,12	0,07	414	415
110	0,11	0,07	529	530
120	0,09	0,06	756	760
130	0,08	0,06	951	955

Note-se no entanto, que é sempre necessário garantir que a inclinação máxima da plataforma (resultante da sobrelevação e da inclinação longitudinal), não seja superior a 10%. É necessária especial atenção para velocidades inferiores a 70 km/h, em que a sobrelevação máxima é mais elevada. Neste caso, e para inclinações da rasante superiores a 6%, o valor máximo da sobrelevação deve ser dado pela seguinte expressão:

$$Se = \sqrt{0,01 - i^2} \quad (6.1)$$

Consequentemente, os valores mínimos dos raios das curvas circulares devem ser aumentados em conformidade, mantendo os coeficientes de atrito transversal constantes no Quadro 6.1.

As Figuras 6.1 e 6.2 pretendem representar a diferença e permitir uma comparação entre os valores admitidos na actual norma de traçado (P3/94) e os valores propostos para o coeficiente de atrito transversal mobilizado (f_t) e os raios mínimos (R_{\min}), respectivamente, para as várias velocidades base.

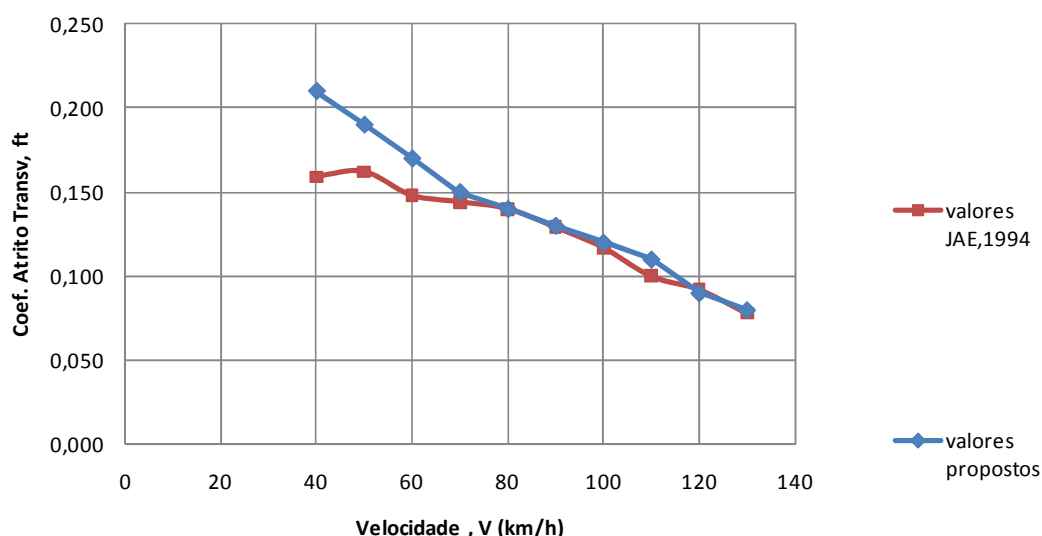


Figura 6.1 - Coeficientes de Atrito Transversal em função da velocidade

Da análise da Figura 6.1 é visível o aumento do valor proposto para os coeficientes de atrito transversal mobilizado, principalmente para velocidades compreendidas entre 40 km/h e 70 km/h. Pode também identificar-se uma incoerência por parte da actual norma de traçado (P3/94), relativamente ao valor admitido para uma velocidade de 50 km/h, que se verifica superior ao da velocidade 40 km/h, sendo que, o coeficiente de atrito transversal mobilizado deveria diminuir à medida que a velocidade aumenta.

A Figura 6.2 traduz a diferença dos raios mínimos que se verifica maior para velocidades elevadas, onde a sobreelevação considerada diminuiu 1%. Para velocidades mais baixas, embora o incremento de sobreelevação tenha sido de 1% e as alterações do coeficiente de

atrito transversal mobilizado tenham sido significativas, a diferença em raios de uma ordem de grandeza baixa não é tão perceptível.

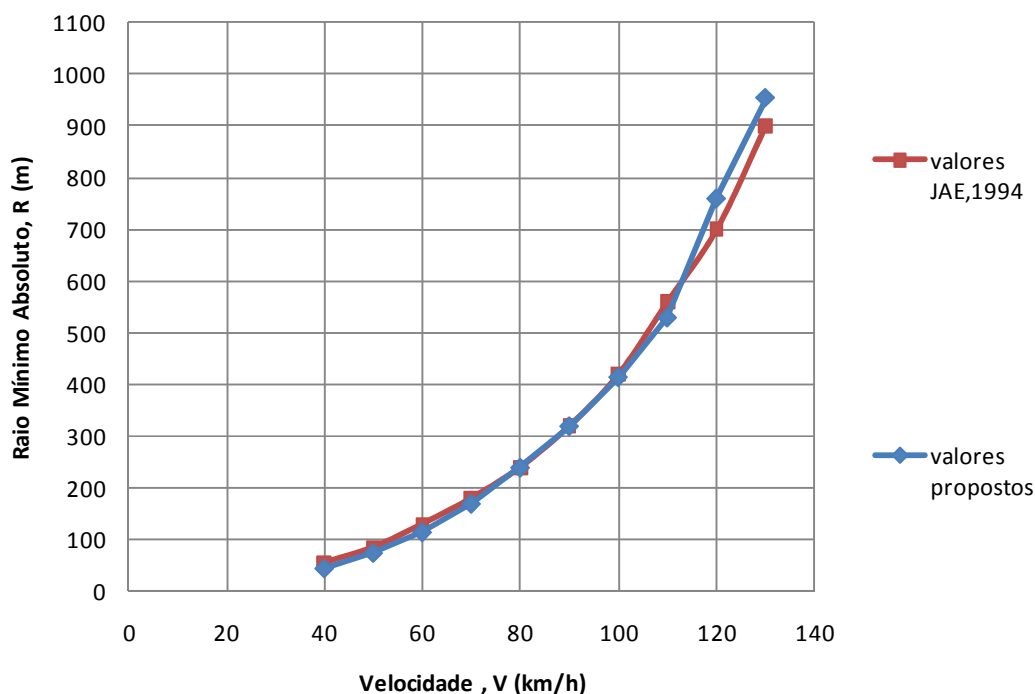


Figura 6.2 - Raios Mínimos em função da velocidade

A utilização de curvas de raios superiores ao mínimo, permite sobreelevações, coeficientes de atrito transversal, ou ambos com valores inferiores aos respectivos limites máximos fixados anteriormente. O decréscimo que cada factor poderá sofrer relativamente ao seu limite, é escolhido de forma a fornecer uma contribuição equitativa que permita suster a aceleração centrífuga e vários métodos podem ser utilizados para atingir este fim.

Contudo, e tal como analisado anteriormente, o Método 5 da AASHTO, que se baseia numa distribuição parabólica dos coeficientes de atrito e da sobreelevação, em função do inverso do raio da curva, parece ser a forma mais equilibrada e que na prática melhor traduz o comportamento de um veículo ao percorrer uma curva, isto porque, por um lado a sobreelevação sustém quase toda a aceleração centrífuga e por outro evita a utilização das sobreelevações máximas para a maior parte das curvas.

Este método apresenta uma distribuição equilibrada das sobrelevações relativamente ao adoptado actualmente pelas normas portuguesa e francesa.

No caso português são privilegiadas as velocidades mais elevadas pela implementação de sobrelevações significativas em detrimento do conforto a velocidades mais baixas.

No caso francês é favorecida a homogeneidade na circulação, pois as baixas sobrelevações aplicadas em curva provocam um desconforto tal nos condutores de modo a que estes instintivamente não atinjam velocidades muito elevadas.

Como já vimos anteriormente, estes são conceitos opostos mas ambos com vantagens e desvantagens. A distribuição parabólica dos coeficientes de atrito e das sobrelevações pretende ser um meio termo mantendo uma proporção equilibrada das vantagens dos dois conceitos e minimizando as respectivas desvantagens.

Aplicando o procedimento de cálculo, anteriormente exposto (4.3.8), relativo à distribuição parabólica, os valores dos raios mínimos obtidos para cada uma das sobrelevações e velocidades base, são os apresentados no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 - Resultados do Método de Distribuição Parabólico

Se (%)	VB= 40 km/h R (m)	VB= 60 km/h R (m)	VB= 80 km/h R (m)	VB= 100 km/h R (m)	VB= 120 km/h R (m)
1,5	784	1490	2406	3582	4770
2,5	438	849	1368	2055	2741
3,0	352	684	1105	1670	2240
3,5	289	571	915	1393	1869
4,0	240	479	770	1183	1590
4,5	200	410	653	1017	1371
5,0	165	349	555	880	1190
5,5	133	300	472	765	1019
6,0	109	253	401	662	756
6,5	91	219	335	564	--
7,0	76	185	240	415	--
7,5	62	157	--	--	--
8,0	43	113	--	--	--

A Figura 6.3 exibe as curvas de distribuição da sobrelevação resultantes deste método, para cada uma das velocidades base consideradas e em função do raio da curva pretendido.

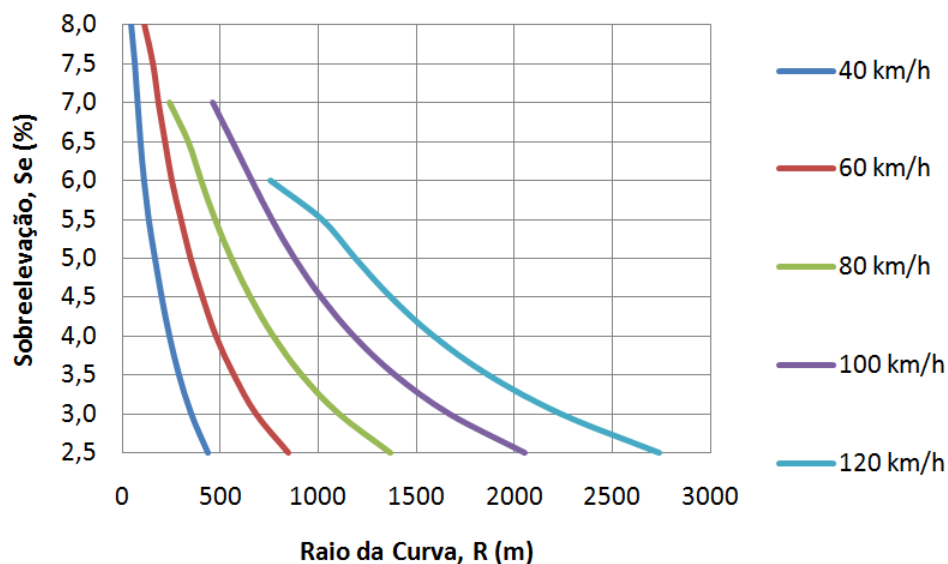


Figura 6.3 - Sobrelevação em função do Raio da Curva para cada uma das Velocidades Base

Para uma leitura mais fácil e directa da sobrelevação, os raios de cálculo foram arredondados e no Quadro 6.3 estão apresentados sob a forma de intervalos.

Importa ainda referir, que a actual norma de traçado apresenta o quadro de sobrelevações em curva para duas situações específicas, “Estradas com 2 Vias” e “Estradas com 2 x 2 Vias” que pode dizer-se corresponderem a dois escalões de velocidades, $V \leq 80$ km/h e $V > 80$ km/h. No entanto, esta divisão tem demonstrado ser muito generalista, pois engloba uma gama muito vasta de raios, que podem ser utilizados em estradas concebidas para diferentes velocidades base, sendo-lhes atribuído o mesmo valor de sobrelevação. Julga-se, portanto, importante definir as sobrelevações a adoptar em função das velocidades base mais adoptadas na concepção dos projectos rodoviários, tal como os restantes parâmetros de traçado.

Quadro 6.3 - Valores Propostos para a Sobrelevação em função da Velocidade e dos Raios em Curva

Se (%)	Velocidade Base (km/h)				
	40	60	80	100	120
8,0	$45 \leq R < 65$	$115 \leq R < 160$	--	--	--
7,5	$65 \leq R < 80$	$160 \leq R < 185$	--	--	--
7,0	$80 \leq R < 95$	$185 \leq R < 220$	$240 \leq R < 335$	$415 \leq R < 565$	--
6,5	$95 \leq R < 110$	$220 \leq R < 255$	$335 \leq R < 405$	$565 \leq R < 665$	--
6,0	$110 \leq R < 135$	$255 \leq R < 300$	$405 \leq R < 475$	$665 \leq R < 765$	$760 \leq R < 1020$
5,5	$135 \leq R < 165$	$300 \leq R < 350$	$475 \leq R < 555$	$765 \leq R < 880$	$1020 \leq R < 1190$
5,0	$165 \leq R < 200$	$350 \leq R < 410$	$555 \leq R < 655$	$880 \leq R < 1020$	$1190 \leq R < 1375$
4,5	$200 \leq R < 240$	$410 \leq R < 480$	$655 \leq R < 770$	$1020 \leq R < 1185$	$1375 \leq R < 1590$
4,0	$240 \leq R < 290$	$480 \leq R < 575$	$770 \leq R < 915$	$1185 \leq R < 1395$	$1590 \leq R < 1870$
3,5	$290 \leq R < 355$	$575 \leq R < 685$	$915 \leq R < 1105$	$1395 \leq R < 1670$	$1870 \leq R < 2240$
3,0	$355 \leq R < 440$	$685 \leq R < 850$	$1105 \leq R < 1370$	$1670 \leq R < 2055$	$2240 \leq R < 2745$
2,5	$440 \leq R < 800$	$850 \leq R < 1500$	$1370 \leq R < 2500$	$2055 \leq R < 3600$	$2745 \leq R < 4800$
^	$800 \leq R$	$1500 \leq R$	$2500 \leq R$	$3600 \leq R$	$4800 \leq R$

^ Perfil transversal a duas águas ($\pm 2,5\%$).

Os raios apresentados para a situação de perfil transversal a duas águas (2,5%) foram igualmente definidos em conformidade com a AASHTO, ou seja, correspondem ao raio para o qual uma sobrelevação de 1,5% é suficiente para compensar a aceleração centrífuga.

7. CONCLUSÕES

7.1. Conclusões do Trabalho

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas no âmbito do trabalho desenvolvido para o estudo dos critérios normativos de curvas em planta e sobreelevações.

Sabendo de antemão que o raio mínimo é um valor limite de curvatura para uma determinada velocidade e é determinado a partir dos valores máximos de sobre elevação e do factor de atrito transversal fixados para o projecto (Quadro 6.1):

- a) A fixação da sobre elevação máxima deve depender, para além do clima (principalmente devido à ocorrência de gelo), das características da estrada que se relacionam directamente com a velocidade base, pois os níveis de conforto proporcionados por velocidades base elevadas podem ser superiores aos correspondentes a velocidades baixas. Na prática significa que a sobre elevação máxima fixada em projectos de velocidades base elevadas pode e deve ser inferior aos de velocidades base baixas;
- b) O coeficiente de atrito transversal máximo correspondente ao ponto em que o pneu começa a escorregar é conhecido como o ponto de derrapagem iminente. Dado que as curvas são projectadas de forma a evitar derrapagens, o coeficiente de atrito transversal efectivamente mobilizado pelos veículos deve ser substancialmente inferior. À medida que a velocidade aumenta, deve procurar-se que o coeficiente de atrito transversal mobilizado seja menor, uma vez que o ponto de derrapagem iminente ocorre para um coeficiente de atrito transversal inferior.

Para o cálculo das sobre elevações correspondentes a raios superiores ao mínimo, estipulados para cada uma das velocidades base, existem vários métodos para manter a aceleração centrífuga em níveis de conforto e segurança aceitáveis para a maior parte dos condutores, fazendo variar os valores da sobre elevação (S_e) e do coeficiente de atrito transversal mobilizado (f_t).

No método adoptado pela Norma de Traçado da JAE, são privilegiadas as velocidades mais elevadas (velocidades específicas) pela implementação de sobreelevações significativas em detrimento do conforto a velocidades mais baixas.

No método adoptado pela SETRA é favorecida a homogeneidade na circulação, pois as baixas sobreelevações aplicadas em curva provocam um desconforto tal nos condutores de modo a que estes instintivamente não atinjam velocidades muito elevadas.

Contudo, e tal como analisado anteriormente, o Método 5 da AASHTO, que se baseia numa distribuição parabólica dos coeficientes de atrito e da sobreelevação, em função do inverso do raio da curva, parece ser a forma mais equilibrada e que na prática melhor traduz o comportamento de um veículo ao percorrer uma curva, isto porque, mantém uma proporção equilibrada das vantagens dos dois conceitos adoptados por Portugal e França, minimizando as respectivas desvantagens.

Podemos assim afirmar que este método é o que parece ajustar-se melhor às condições de comodidade e segurança de circulação (Quadro 6.2).

É também importante definir as sobreelevações a adoptar em função das velocidades base mais adoptadas na concepção dos projectos rodoviários, visto que a actual divisão “Estradas com 2 Vias” e “Estradas com 2 x 2 Vias” é bastante generalista, pois engloba uma gama muito vasta de raios, que podem ser utilizados em estradas concebidas para diferentes velocidades base, sendo-lhes atribuído o mesmo valor de sobreelevação (Quadro 6.3).

7.2. Recomendação de Propostas de Estudos Futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido relativo à proposta de raios mínimos em planta e sobrelevações seria importante a aferição dos valores do coeficiente de atrito mobilizado tendo em conta os tipos de pavimento utilizados em Portugal.

Dado que o coeficiente de atrito é um parâmetro evolutivo no tempo em função de factores tais como, tipo de camada de desgaste, condições climáticas e o tráfego a que estão sujeitas, seria interessante estudar a importância de seguir um plano de gestão que assegure níveis de coeficiente de atrito, em estradas existentes, compatíveis com a segurança de circulação dos veículos e dos seus utentes, intervindo sempre que essas condições não estejam garantidas e comparar a sinistralidade observada antes e depois das respectivas intervenções.

A nível internacional, era importante poder comparar a sinistralidade, no caso particular de despistes em curva em estradas que se encontrem executadas segundo as normas geométricas de traçado actualmente em vigor e daí tirar conclusões mais específicas relativamente à utilização de diferentes critérios e valores de sobrelevação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2001) - **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, American Association of State Highway of Transportation Officials**. Washington DC, USA. ISBN: 1-56051-156-7.

AASHTO (2004) - **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, American Association of State Highway of Transportation Officials**. Washington DC, USA. ISBN: 1-56051-263-6.

DECRETO-LEI nº 222/98. D.R. I-A Série, 163 (98-07-17) 3444.

DGV - Sinistralidade Rodoviária. Relatórios anuais. Direcção Geral de Viação, Ministério da Administração Interna, Lisboa. 2004.

BARNETT, J. - **Safe side Friction Factors and Superelevation Design**. Highway Research Board, Vol.16, 1936. (citado em AASHTO, 2004)

BEGONHA, João Bernardo Mora Moraes Pessoa - Parâmetros Cinemáticos Aferidores da Comodidade e Segurança junto aos Bordos das Vias. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005. Tese de Mestrado.

BOE nº 28/00. Orden 2107 (99-12-27) - Instrucción de Carreteras 3.1-1C Trazado. Secretaria de Estado de Infraestructuras y Transportes. España, 1999.

BRANCO, F.; PEREIRA, P. SANTOS, L.P. - **Pavimentos Rodoviários**. Edições Almedina, Coimbra, 2006. ISBN: 978-972-40-2648-0.

EP, Estradas de Portugal, SA. - Caderno de Encargos Tipo Obra. Pavimentação. Características dos Materiais. Almada, 2008.

EP, Estradas de Portugal, SA. - Caderno de Encargos Tipo Obra. Pavimentação. Métodos Construtivos. Almada, 2009.

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA (Universidade Nova), Caparica. Apontamentos da disciplina de Vias de Comunicação. Acessível na Faculdade de Ciências e Tecnologia.

FRANÇA, Adalberto Quelhas da Silva - A Comodidade e a Segurança como Critérios Condicionantes da Geometria do Traçado. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1988. Tese de Doutoramento.

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, Lisboa. Apontamentos da disciplina de Vias de Comunicação. Acessível no Instituto Superior Técnico.

JAE - Norma de Nós de Ligação, JAE P6/90 Divisão de Estudos e Projectos da Junta Autónoma das Estradas, Edição JAE, Lisboa, Portugal. 1990.

JAE - Norma de Traçado, JAE P3/78; Divisão de Estudos e Projectos da Junta Autónoma das Estradas, Edição JAE Lisboa, Portugal. 1978.

JAE - Norma de Traçado, JAE P3/94; Divisão de Estudos e Projectos da Junta Autónoma das Estradas, Edição JAE Lisboa, Portugal. 1994.

LAMM, R.; PSARIANOS, B.; MAILAENDER, T. - **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook**. McGraw Hill Companies Inc., New York. 1999 (Citado em AASHTO, 2004)

LNEC – Vocabulário de Estradas e Aeródromos, 4ª Edição, Especificação E1-1962, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. 1962.

MENEZES, Miguel Vaz Preto - Estudo das Características de Superfície de Pavimentos Rodoviários para análise da Segurança do Tráfego. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2008. Tese de Mestrado.

MOREIRA, António Maria Pinto - Avaliação de traçados Rodoviários. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000. Tese de Mestrado.

MOYER, R. A., and D. S. Berry. **Marking Highway Curves with Safe Speed Indications.** Proceedings HRB, Vol. 20, Highway Research Board, 1940: 399-428. (citado em AASHTO, 2004)

MOYER, R. A. **Skidding Characteristics of Automobile Tires on Roadway Surfaces and Their Relation to Highway Safety,** Bulletin No. 120, Ames, Iowa: Iowa Engineering Experiment Station, 1934. (citado em AASHTO, 2004)

SETRA - ARP. **Aménagement dès routes principales. Recommandations techniques pour la conception générale et la géométrie de la route.** Guide technique. France. 1994. Réf.B9413.

SETRA - **Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique dès routes.** Collection “Les rapports”. France. 2006. Réf.0607W.

SETRA - ICTAAL. **Instruction sur les conditions techniques d’aménagement des autoroutes de liaison.** Circulaire du 12 décembre 2000. France. 2000. Réf.B0103.

MELO, Arnaldo Sousa - Contribuição para o estudo da capotagem. Núcleo de Vias de Comunicação do C.E.C.U.P. Memória nº5. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1978.

UNECE - Statistics of Road Traffic Accidents in Europe and North America. Vol. LI, Tom. LI. United Nations. 2007. <http://www.unece.org/trans/main/wp6/wp6.html>
