

# ANÁLISE CRÍTICA DE MODELOS DE VERIFICAÇÃO DE CONSISTÊNCIA DE TRAÇADO

**Felipe Issa Kabbach Junior**

**Carlos Yukio Suzuki**

**Leandro Cardoso Trentin**

**Angela Martins Azevedo**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Transportes

## RESUMO

A segurança viária é diretamente relacionada, entre outros fatores, com as características do traçado da via. O trabalho tem como objetivo realizar uma comparação entre dois modelos de análise de consistência de traçado, o método dos critérios de segurança, desenvolvido por Lamm, e o método proposto por Fitzpatrick incorporado no programa IHSDM (*Interactive Highway Safety Design Model*) pelo módulo DCM (*Design Consistency Module*), desenvolvido pela FHWA (*Federal Highway Administration*). A comparação é realizada através de estudo de caso, considerando os dados de uma rodovia existente. São apresentadas as principais características de cada procedimento e as diferenças resultantes da análise.

## ABSTRACT

The road safety is directly related, among others factors, with the characteristics of the alignment of the highway. This paper has the objective to make a comparison between two models of alignment consistency evaluation. The methods considered are the safety criteria, developed for Lamm, and the one proposed by Fitzpatrick used in software IHSDM (*Interactive Highway Safety Design Model*) developed for FHWA (*Federal Highway Administration*), by the DCM (*Design Consistency Module*). A case study was applied to a section of an existing road. The main characteristics of each procedure and the resultant differences of the analysis are presented.

## 1. INTRODUÇÃO

A segurança e o conforto que uma rodovia proporciona ao usuário estão relacionados a uma série de fatores que envolvem características do próprio usuário e da via. Entre estas, pode-se destacar principalmente a condição funcional do pavimento e a velocidade de operação que o usuário pode alcançar. Este parâmetro é função das características do traçado da via, como a seção transversal e os alinhamentos horizontal e vertical. É a concordância entre essas características, também chamada de consistência do traçado, o objeto deste estudo.

Segundo Lunenfeld *apud* Lamm, a consistência do traçado reflete-se na expectativa dos motoristas quanto à fluidez do traçado da via e influencia no tempo de reação para tomada de decisão quando da alteração do traçado.

Os problemas de consistência ocorrem quando as características do trecho sofrem alterações em segmentos consecutivos, deixando de proporcionar condições seguras de trafegabilidade. Tais problemas são realçados por alterações na velocidade de operação, mudanças bruscas na trajetória dos veículos e altos índices de acidentes em determinados segmentos. Do ponto de vista do usuário, a inconsistência do traçado é percebida quando a expectativa do motorista não é atendida.

Estudos recentes realizados no Brasil e no exterior indicam a necessidade de estudos acerca da consistência de traçado na fase de projeto de rodovias. Os principais métodos referem-se à análise das características geométricas da via, através do perfil de velocidades proporcionadas

pelo traçado e à análise dos tempos de resposta dos motoristas às mudanças no traçado. Os principais métodos para análise do traçado são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Métodos de Análise**

Método	Características
Método dos critérios de segurança (Lamm <i>et al</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Critérios de segurança (I, II e III)</li> <li>• Ponderação entre os critérios</li> <li>• <math>V_{85} = f</math> (grau da curva)</li> <li>• Tangentes são elementos dinâmicos</li> </ul>
Método do IHSDM (Fitzpatrick <i>et al</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{85} = f</math>(alinhamentos horizontal e vertical)</li> <li>• Tangentes são elementos dinâmicos</li> <li>• Aceleração e desaceleração = <math>f</math>(alinhamentos horizontal e vertical)</li> </ul>
Método Leisch e Leisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{85} = f</math>(grau da curva), em curvas e tangentes</li> <li>• Considera desempenho dos caminhões nas rampas</li> </ul>
Método Messer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{85} = f</math>(tempo de reação corrigido)</li> </ul>
Método Suíço	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tangentes são elementos dinâmicos;</li> <li>• <math>\left  V_{85,i} - V_{85,i+1} \right  \leq 20\text{km/h}</math></li> </ul>
Método Australiano	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise do ambiente de velocidades</li> <li>• <math>V_{\text{ambiente de velocidades}} - V_{85} &lt; 10\text{km/h}</math></li> </ul>

## 2. MODELOS CONSIDERADOS

Os modelos para avaliar a consistência do projeto geométrico a partir da velocidade de operação têm como foco principal a observação do comportamento dos veículos nas curvas dos alinhamentos horizontal e vertical.

No entanto, estudos desenvolvidos na Suíça mostram que também ocorre excesso de velocidade nas tangentes. Dessa forma, recomenda-se que os trechos em tangente sejam considerados “elementos dinâmicos”, devendo ser observados os movimentos de aceleração e desaceleração.

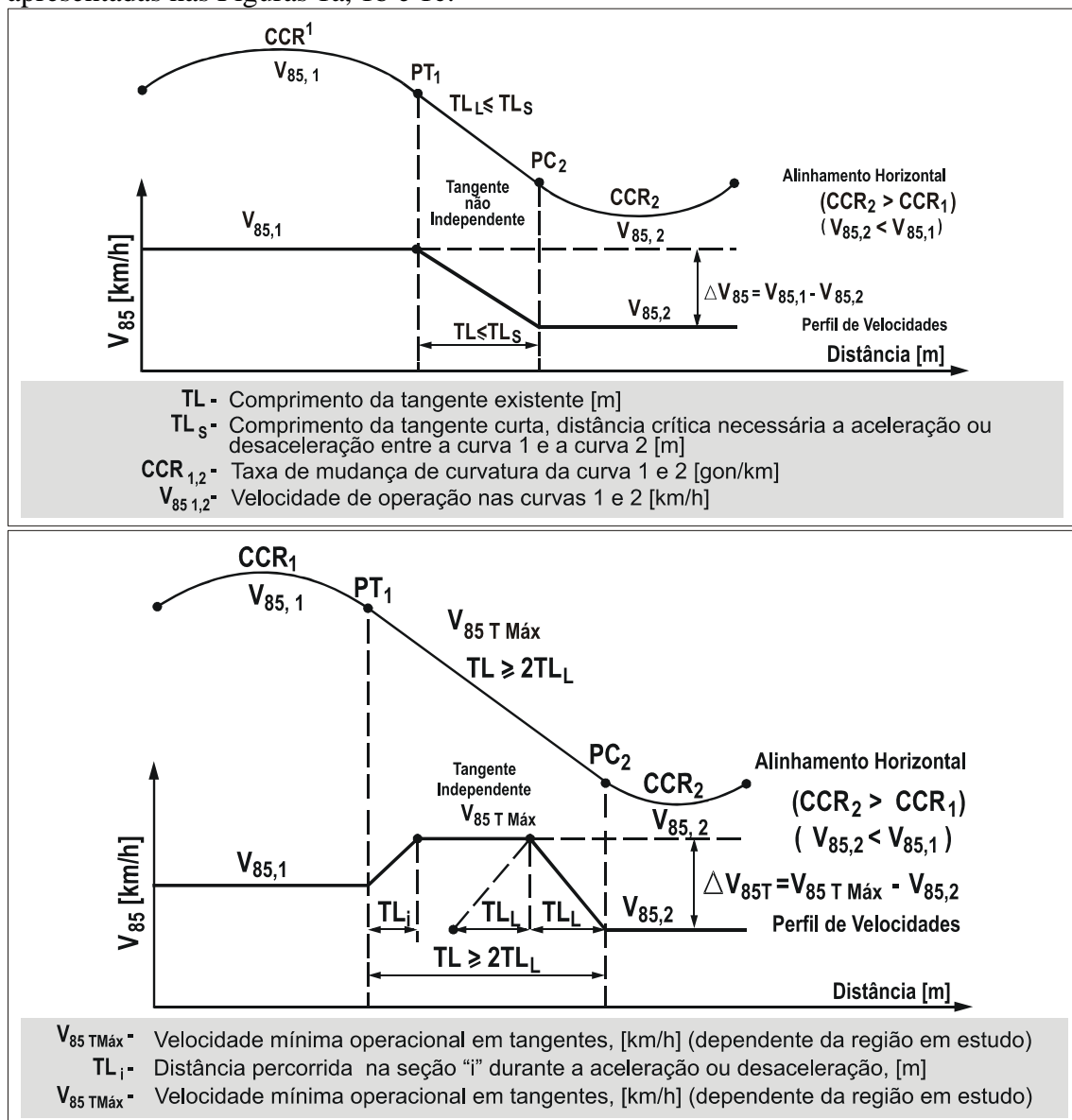
Na análise a ser realizada, serão considerados dois métodos: o proposto por Lamm *et al* (Critérios de Segurança) e o método considerado pelo programa IHSDM (*Interactive Safety Design Model*), da FHWA (*Federal Highway Administration*), baseado nos estudos de Fitzpatrick *et. al*.

### 2.1.Método dos Critérios de Segurança:

O procedimento de análise proposto por Lamm considera que as mudanças na velocidade de operação ( $V_{85}$ ) entre um trecho de tangente e uma curva horizontal, ou entre duas curvas horizontais sucessivas de uma pista única com uma faixa de tráfego por sentido, são função da relação de dependência existente entre os elementos componentes do alinhamento.

Neste método, a avaliação da consistência de um traçado baseia-se na determinação da relação de dependência, função da extensão dos trechos de análise. Isto é, uma tangente é considerada independente se o seu comprimento é tão longo que a corrente de tráfego consegue acelerar até a velocidade desejada, sem que haja influência de uma curva ou qualquer outro elemento inibidor. Em outras palavras, as tangentes devem ter comprimento suficiente para acomodar a aceleração e a desaceleração na saída e na entrada de curvas sucessivas.

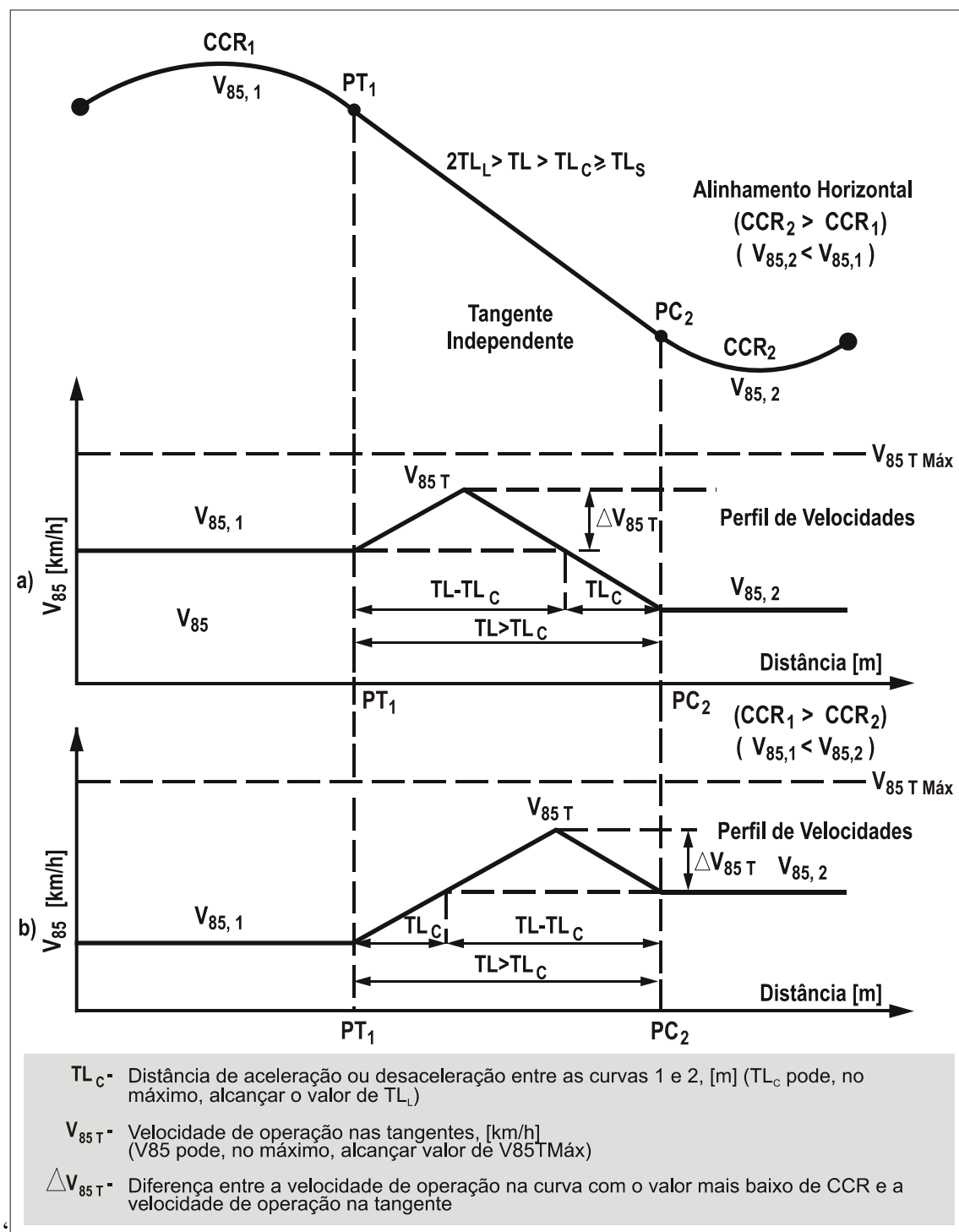
Para a classificação das tangentes segundo critérios de dependência e para a estimativa das velocidades reais possíveis de serem praticadas deve-se observar as considerações apresentadas nas Figuras 1a, 1b e 1c.



**Figura 1** – Classificação das tangentes segundo critérios de dependência

(a) Tangentes não independentes

(b) Tangentes independentes, com extensão insuficiente para aceleração



**Figura 1** – Classificação das tangentes segundo critérios de dependência  
 (c) Tangentes independentes, com extensão suficiente para aceleração

Classificadas as tangentes quanto a relação de dependência, a variação da velocidade é analisada conforme três critérios de segurança. No primeiro – Critério I – a comparação da velocidade de operação ( $V_{85}$ ) e entre a velocidade de projeto ( $V_d$ ) é realizada em cada elemento do alinhamento. O Critério II realiza a análise em elementos sucessivos do alinhamento e o Critério III, ao contrário dos anteriores, é relacionado aos aspectos dinâmicos

do traçado, e compara os coeficientes de atrito lateral assumido e o demandado no traçado. Os intervalos considerados na avaliação estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Critérios para a classificação da consistência do traçado**

Critério	Diferenças permitidas Projeto BOM	Diferenças Toleradas Projeto RAZOÁVEL	Diferenças Não Permitidas Projeto RUIM
I	$ V_{85} - V_d  \leq 10$	$10 <  V_{85} - V_d  \leq 20$	$ V_{85} - V_d  > 20$
II	$ V_{85i} - V_{85i+1}  \leq 10$	$10 <  V_{85i} - V_{85i+1}  \leq 20$	$ V_{85i} - V_{85i+1}  > 20$
III	$0,015 \leq f_{RA} - f_{RD}$	$-0,03 \leq f_{RA} - f_{RD} < 0,015$	$f_{RA} - f_{RD} \leq -0,03$

Onde:

$V_{85}$  = velocidade praticada por até 85% dos motoristas (km/h)

$V_d$  = velocidade de projeto (km/h)

$f_{RA, RD}$  = fator de atrito lateral assumido/demandado

Esses critérios de segurança podem conduzir diferentes condições de traçado (bom, razoável, ruim) num mesmo segmento em análise. Em caso de empate, o método sugere os valores apresentados na tabela 3.

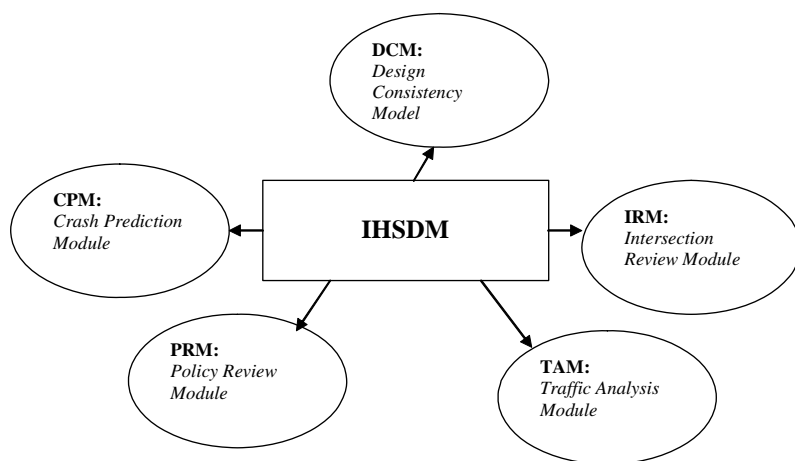
**Tabela 3 – Critérios de desempate**

Classificação pelos Critérios I, II e III	Classificação ponderada
3 x BOM	BOM
2 x BOM / 1 x RAZOÁVEL	
2 x BOM / 1 x RUIM	
3 x RAZOÁVEL	RAZOÁVEL
2 x RAZOÁVEL / 1 x BOM	
2 x RAZOÁVEL / 1 x RUIM	
1 x BOM / 1 x RAZOÁVEL / 1 x RUIM	
3 x RUIM	RUIM
2 x RUIM / 1 x BOM	
2 x RUIM / 1 x RAZOÁVEL	

## 2.2.Método IHSDM:

O departamento de transportes do governo federal dos Estados Unidos da América, através da FHWA, elaborou um programa cujo objetivo é permitir aos projetistas e fiscais de projeto analisar alternativas de projeto geométrico no que diz respeito à segurança proporcionada pelo traçado.

O IHSDM – *Interactive Safety Design Model* – é composto por cinco módulos, conforme apresentado na Figura 2, cada qual com foco de análise distinto. Aqui, o módulo de interesse é o DCM – *Design Consistency Model*, que avalia a variação da velocidade em função dos elementos de alinhamento horizontal e vertical do traçado.



**Figura 2** – Esquema do IHSDM

O módulo DCM do IHSDM considera os aspectos dos alinhamentos horizontal e vertical para análise da segurança relacionada ao traçado da via. São determinadas as velocidades de operação ( $V_{85}$ ) dos veículos de passeio ao longo da via. O perfil de velocidades combina as velocidades de operação nas curvas (horizontal, vertical e sua combinação), velocidade de desejo na tangente, aceleração e desaceleração nas aproximações de curvas e um algoritmo para prever as velocidades nos greides.

A partir do perfil de velocidades são determinadas duas medidas:

- a diferença das velocidades de projeto e operação ao longo da via;
- a diferença da velocidade de operação entre elementos da geometria (exemplo, entre tangente e curva).

Os parâmetros de entrada do módulo são: os alinhamentos horizontal e vertical, velocidade de projeto e a velocidade de desejo na tangente e tipo de veículo de passeio. Para previsão de velocidade de velocidades são utilizadas as equações de previsão de velocidades apresentadas na Tabela 4 (FHWA-RD-99-171).

**Tabela 4** – Equações de Previsão de velocidades para Veículos de Passeio

-	Condição de Alinhamento	Equação	Número de Pesquisas	R <sup>2</sup>
1	Curva horizontal Declividade _ $-9\% \leq i < -4\%$	$V_{85} \leq 102,10 - \frac{3077,13}{R}$	21	0,58
2	Curva horizontal Declividade _ $-4\% \leq i < 0\%$	$V_{85} \leq 105,98 - \frac{3709,90}{R}$	25	0,76
3	Curva horizontal Declividade _ $0\% \leq i < 4\%$	$V_{85} \leq 104,82 - \frac{3574,51}{R}$	25	0,76
4	Curva horizontal Declividade _ $4\% \leq i < 9\%$	$V_{85} \leq 96,61 - \frac{2752,19}{R}$	23	0,53
5	Curva horizontal combinada com Curva Vertical côncava	$V_{85} \leq 105,32 - \frac{3468,19}{R}$	25	0,92
6	Curva horizontal combinada com curva vertical convexa sem limite de distância de visibilidade	(ver nota 3)	13	n / a

7	Curva horizontal combinada com curva vertical convexa com limite de distância de visibilidade ( $K \leq 43$ m/%)	$V_{85} \leq 103,24 - \frac{3576,51}{R}$ (ver nota 4)	22	0,74
8	Curva vertical côncava em tangente.	$V_{85} =$ assumir a velocidade de desejo	7	n / a
9	Curva vertical convexa sem limite de distância de visibilidade em tangente	$V_{85} =$ assumir a velocidade de desejo	6	n / a
10	Curva vertical convexa com limite de distância de visibilidade ( $K \leq 43$ m/%) em tangente	$V_{85} \leq 105,08 - \frac{149,69}{K}$	9	0,60

Notas:

1 – Número da equação para condição de alinhamento;

2 – Onde:  $V_{85} = 85^{\circ}$  percentil da velocidade dos veículos de passeio (km/h)

$K =$  Taxa de curvatura vertical (m/%)

$R =$  Raio da curva (m);

3 – Utilizar a menor velocidade das equações 1 e 2 (declive), e equações 3 e 4 (aclive);

4 – Em adição, pode ser utilizada a menor velocidade das equações 1 e 2 (declive), e equações 3 e 4 (aclive).

Foram desenvolvidos novos modelos para prever a aceleração / desaceleração considerando o efeito do raio. Na tabela 5 apresentam-se valores de aceleração / desaceleração, elaborados a partir das pesquisas em campo.

**Tabela 5 – Taxas de Aceleração / Desaceleração**

Taxa de desaceleração $d$ ( $m/s^2$ )		Condições de alinhamento		Taxa de aceleração $a$ ( $m/s^2$ )	
<u>Raio, <math>R</math> (m)</u>	<u><math>d</math></u>	1 – 4	Curva Horizontal com declividade: $-9\% \leq i < 9\%$	<u>Raio, <math>R</math> (m)</u>	<u><math>a</math></u>
$R \geq 436$	0,00			$R > 875$	0,00
$175 \leq R < 436$	$0,6794 \times \frac{295,14}{R}$			$436 < R \leq 875$	0,21
$R < 175$	1,00			$250 < R \leq 436$	0,43
				$175 < R \leq 250$	0,54
1,00		5	Curva horizontal combinada com curva vertical côncava	0,54	
(Usar as taxas para as condições de alinhamento 1 a 4)		6	Curva horizontal combinada com curva vertical sem limite de distância de visibilidade	(Usar as taxas para as condições de alinhamento 1 a 4)	
1,00		7	Curva horizontal combinada com curva vertical com limite de distância de visibilidade ( $K \leq 43,0$ m/%)	0,54	
n/a		8	Curva Vertical côncava em tangente	n/a	
n/a		9	Curva vertical sem limite de distância de visibilidade em tangente horizontal	n/a	
1,00		10	Curva vertical com limite de distância de visibilidade em tangente horizontal ( $K \leq 43,0$ m/%)	0,54	

### **3. ESTUDO DE CASO**

Com o objetivo de permitir a comparação dos dois procedimentos em discussão, foi realizada análise da consistência do traçado de uma rodovia existente.

O trecho escolhido situa-se na rodovia SP-098, localizada no estado de São Paulo, entre os km 55 e 98. A rodovia atravessa trechos de topografia bem distinta, sendo o segmento inicial com características de planalto, o trecho subsequente de serra, com curvas mais acentuadas, e o último trecho localiza-se na planície litorânea, com longos trechos em tangente.

Para ambos os procedimentos de análise, foi necessário o levantamento das características dos alinhamentos horizontal e vertical, sendo elaboradas tabelas com os principais parâmetros (coordenadas dos pontos de concordância, pontos de tangencia, raios das curvas e greides de cada trecho).

Para cada procedimento, foram calculadas as velocidades de operação ( $V_{85}$ ) com base nos elementos geométricos. Ainda, conforme o critério de análise, tais elementos foram analisados de forma independente ou dependente.

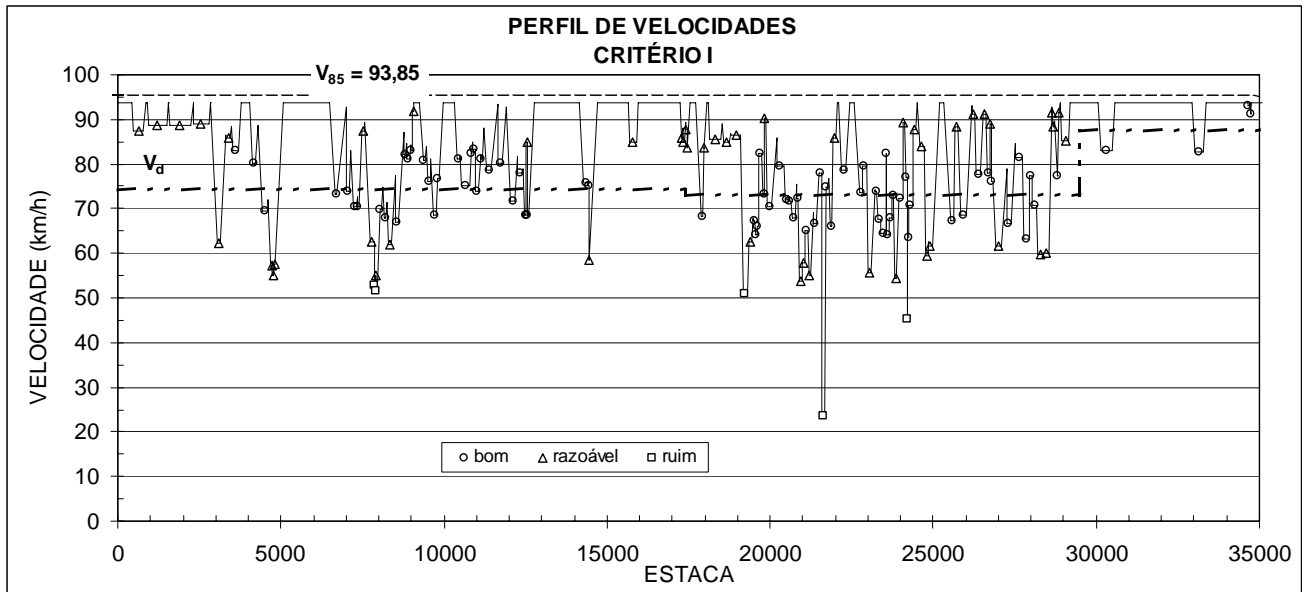
Em seguida, a velocidade de operação foi comparada a velocidade de projeto e, conforme o critério de análise, o desempenho do trecho foi classificado em bom, regular e ruim.

Para determinar a velocidade de projeto, foi considerado o método apresentado por Lamm, a partir de uma média ponderada das Taxas de Mudança de Curvatura (CCR) no trecho, sendo contempladas as seguintes velocidades:

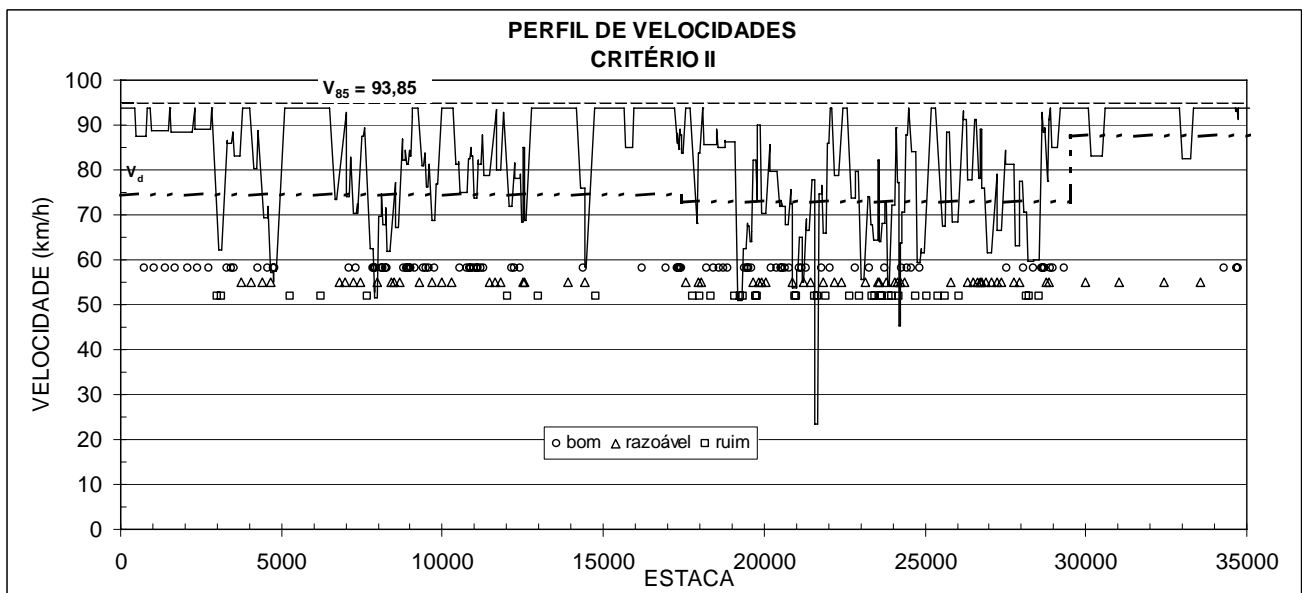
- Trecho planalto: 74,30 km/h;
- Trecho de serra: 72,93 km/h;
- Trecho de planície: 87,54 km/h.

#### **3.1 Método dos Critérios de Segurança:**

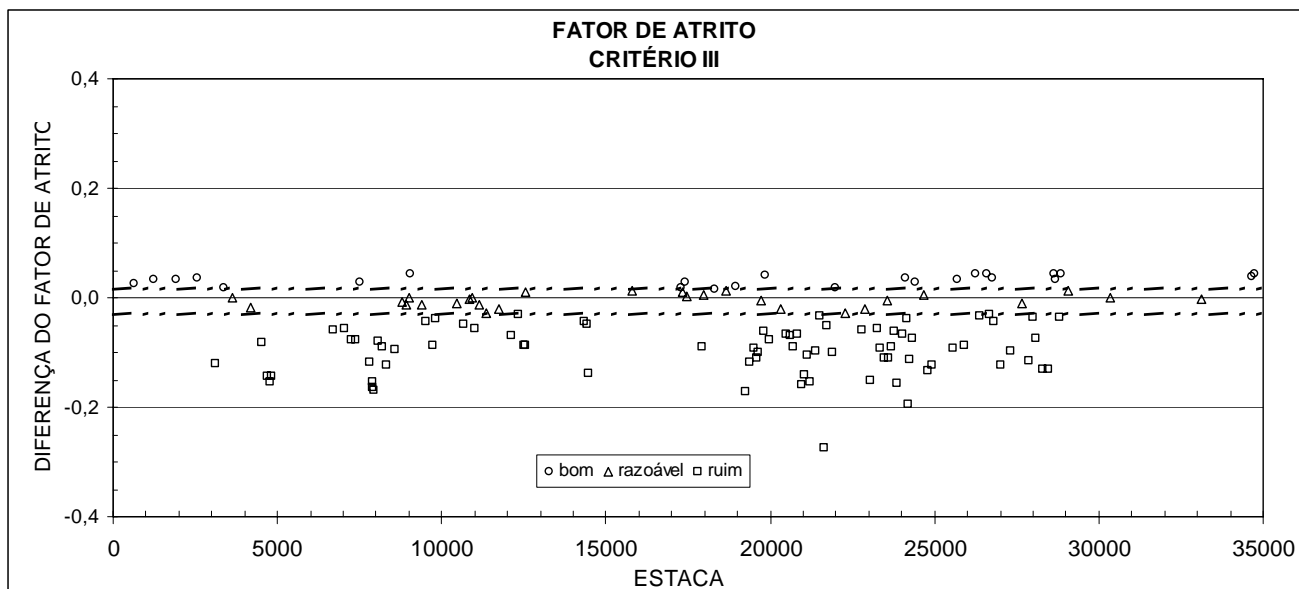
Os gráficos de cada análise dos critérios de segurança estão apresentados a seguir.



**Figura 3 – Perfil de velocidades(critério I)**



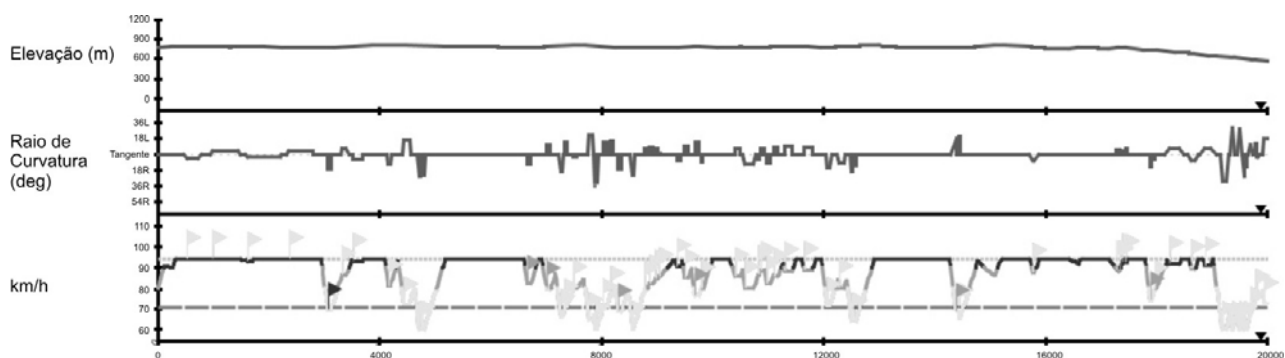
**Figura 4 – Perfil de Velocidades (Critério II)**



**Figura 5 - Fator de Atrito (Critério III)**

### 3.2 Método IHSDM:

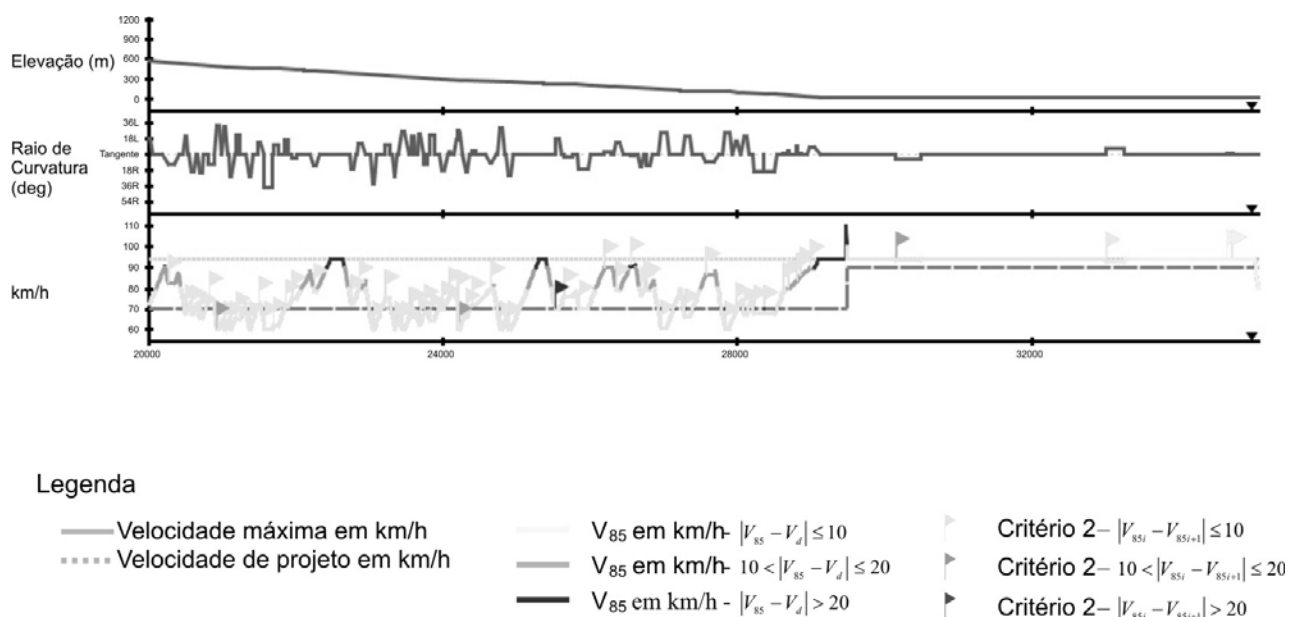
São apresentados os gráficos de análise do módulo DCM do IHSDM, para o sentido do estaqueamento crescente da rodovia.



#### Legenda

- |                                     |  |   |
|-------------------------------------|--|---|
| — Velocidade máxima em km/h         | — $V_{85}$ em km/h - $ V_{85} - V_d  \leq 10$      | ▲ Critério 2 - $ V_{85i} - V_{85i+1}  \leq 10$      |
| ..... Velocidade de projeto em km/h | — $V_{85}$ em km/h - $10 <  V_{85} - V_d  \leq 20$ | ▲ Critério 2 - $10 <  V_{85i} - V_{85i+1}  \leq 20$ |
|                                     | — $V_{85}$ em km/h - $ V_{85} - V_d  > 20$         | ▲ Critério 2 - $ V_{85i} - V_{85i+1}  > 20$         |

**Figura 6 – Análise de consistência – DCM – Estaca 0 a Estaca 20000**



**Figura 7** – Análise de consistência – DCM – Estaca 20000 a Estaca 35080

#### 4. CONCLUSÕES E ANÁLISES CRÍTICAS

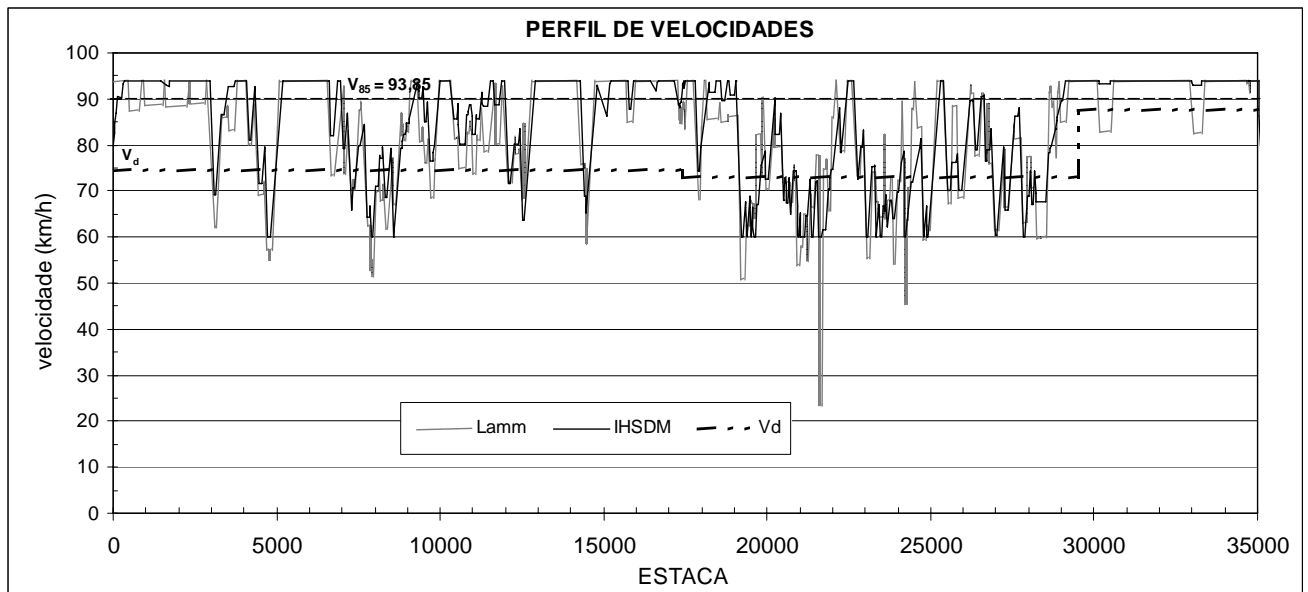
Uma vez que os procedimentos assumem premissas distintas, os resultados obtidos apresentam diferenças, evidenciadas através da análise dos gráficos apresentados no item “Estudo de Caso”. A Figura 8, apresentada a seguir, sintetiza a comparação entre os dois métodos de análise.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que as análises realizadas pelo método dos critérios de segurança (Lamm) e pelo IHSDM são semelhantes. No entanto, os parâmetros considerados pelo método de Lamm são mais críticos, sendo o resultado desta análise mais conservador.

Uma dificuldade encontrada é a determinação da velocidade de projeto para rodovias existentes sem a disponibilidade do projeto original da via. No estudo, a estimativa só foi possível utilizando uma média ponderada das curvas no segmento e a equação de previsão de velocidades. Porém, existe a ressalva da utilização desta velocidade uma vez que não é conhecida a sobrelevação das curvas da via.

As equações de velocidade foram elaboradas para as condições de outros países, fazendo-se necessárias a pesquisa e determinação de equações de previsão para as condições brasileiras. No módulo DCM do IHSDM, é possível calibrar o tipo de veículo de passeio e, portanto, fazer um ajuste quanto a este aspecto para as condições do Brasil.

Ainda no módulo DCM do IHSDM, não são realizadas considerações acerca dos fatores de atrito previsto e demandado na curva, conforme o critério de segurança proposto por Lamm e conforme calculado para o estudo da Rodovia SP-098. Através dos resultados obtidos, verifica-se que este critério é o que apresenta valores mais sensíveis a inconsistência do traçado.



**Figura 8 – Comparação entre resultados**

Uma grande diferença entre os métodos é o tratamento de curvas espirais, sendo que no método de Lamm a sua velocidade de operação é determinada juntamente com a curva, e no módulo DCM a transição é tratada como uma parte da tangente. Conforme Fitzpatrick *et al*, a velocidade de operação nas curvas com e sem espiral são semelhantes e não resultam em diferenças significativas. Mas a utilização da curva espiral como tangente gera uma diferença entre as análises, principalmente pela diferença nas extensões de tangentes analisadas.

Seria de grande valia para o programa IHSDM a utilização do critério de segurança proposto por Lamm em relação aos fatores de atrito assumido e demandado. Também há necessidade de uniformização da consideração das curvas espirais nos métodos apresentados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kabbach Jr, F. I (2004). *Notas de Aula da Disciplina PTR-5725*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Lamm, R., Mailaender, T. e Psarianos, B. (1998) *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Osório, C. A. A. C. (2000) *Avaliação da Consistência do Traçado de Rodovias com Duas Faixas de Tráfego*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- Federal Highway Administration (2004) *Manual do IHSDM*. Washington D.C. USA
- Fitzpatrick, K (2000). *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways – Report FHWA-RD-99-171*. Washington D.C., USA.
- Fitzpatrick, K. (2000). *Alternative design Consistency Rating Methods for Two-Lane Rural Highways – Report FHWA-RD-99-172*. Washington D.C., USA.
- Fitzpatrick, K.(2000). *Evaluation of design Consistency Methods for Two-Lane Rural Highways, Executive Summary — Report FHWA-RD-99-173*. Washington D.C., USA.
- Elefteriadou, L., Fitzpatrick, K., Harwood, D., Potts, I., Torbic D. e Wooldridge, M.(2003). *Geometric Design Consistency on High-Speed Rural Two-Lane Roadways – NCHRP Report 502*. Transportation Research Board. Washington D.C., USA.